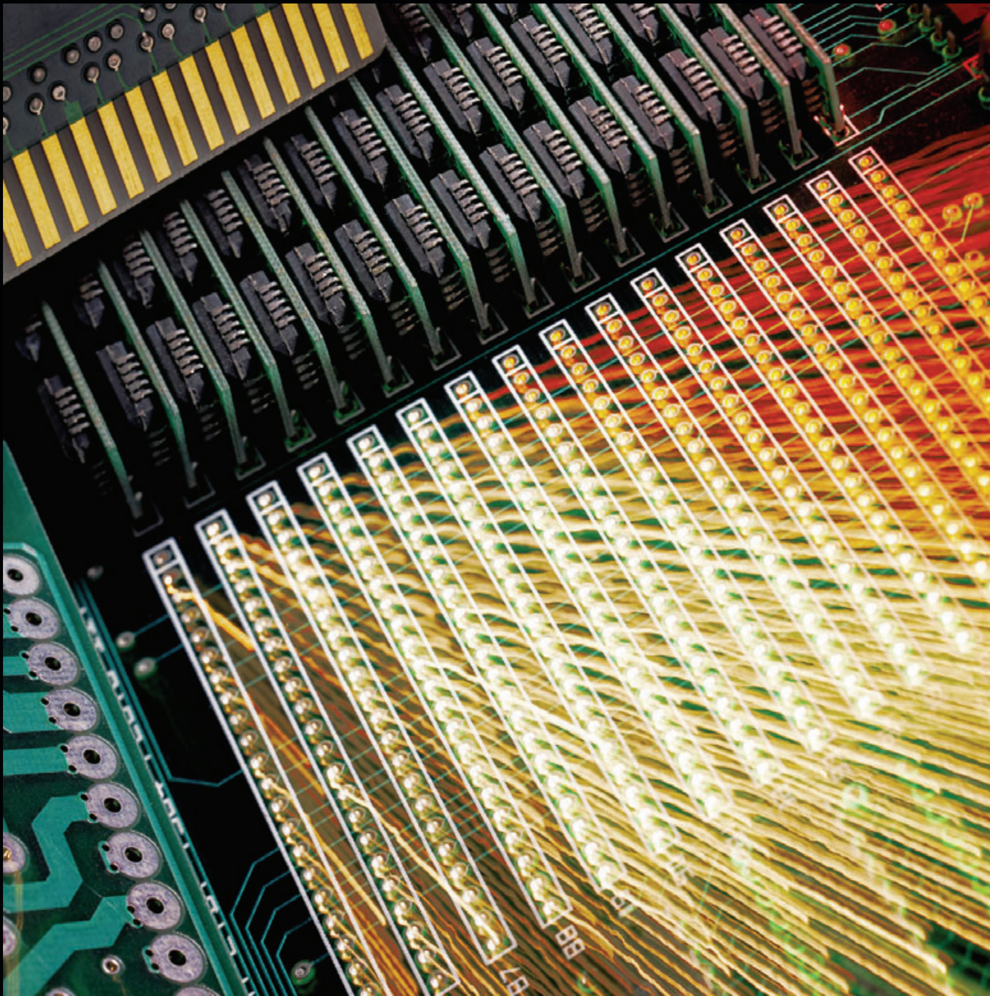
OCTAVA EDICIÓN

PRINCIPIOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS



FLOYD

PEARSON
Prentice Hall®

INCLUYE CD-ROM

PRINCIPIOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Octava edición

Thomas L. Floyd

TRADUCCIÓN
Rodolfo Navarro Salas
Ingeniero Mecánico
Universidad Nacional Autónoma de México

REVISIÓN TÉCNICA
Luis Mauro Ortega González
Ingeniero Mecánico Electricista
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Campus Estado de México

Gustavo Pérez López
Maestro en Ciencias
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Campus Estado de México

PEARSON
Educación ®

México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

FLOYD, THOMAS L.

Principios de circuitos eléctricos. Octava edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2007

ISBN: 978-970-26-0967-4
Área: Ingeniería

Formato: 21 × 27 cm Páginas: 968

ISBN 0-13-170179-7

Edición en español

Editor: Luis Miguel Cruz Castillo
e-mail: luis.cruz@pearsoned.com
Editor de desarrollo: Bernardino Gutiérrez Hernández
Supervisor de producción: José D. Hernández Garduño

Edición en inglés

Acquisitions Editor: Kate Linsner
Production Editor: Rex Davidson
Design Coordinator: Diane Ernsberger
Editorial Assistant: Lara Dimmick
Cover Designer: Candace Rowley
Cover art: Getty
Production Manager: Matt Ottenweller
Senior Marketing Manager: Ben Leonard
Marketing Assistant: Les Roberts
Senior Marketing Coordinator: Liz Farrell

OCTAVA EDICIÓN 2007



ISBN 10: 970-26-0967-4
ISBN 13: 978-970-26-0967-4

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 10 09 08 07

DEDICATORIA

Una vez más, a Sheila
Con amor

PREFACIO



La octava edición de *Principios de circuitos eléctricos* proporciona una cobertura completa y directa de los fundamentos de componentes y circuitos eléctricos. Explica y aplica las leyes fundamentales y los métodos de análisis de circuitos en diversos circuitos básicos. Hace hincapié en aplicaciones, muchas de las cuales son nuevas en esta edición, y la mayor parte de los capítulos contiene una sección especial llamada *Una aplicación de circuito*. *Localización de fallas* continúa siendo una parte importante de esta edición, y muchos capítulos incluyen una sección especial dedicada al tema.

Lo nuevo en esta edición

- La disposición y el diseño del texto
- Archivos Multisim para ejemplos seleccionados
- Archivos Multisim 8, además de Multisim 2001 y Multisim 7, para Localización de fallas y Análisis de problemas
- La cobertura de fasores se cambió al capítulo 11, Introducción a la corriente alterna y al voltaje alternos
- La cobertura de números complejos se cambió al capítulo 15, Circuitos *RC*
- Problemas nuevos en la mayor parte de los capítulos
- Numerosas mejoras a lo largo del texto
- Innovadoras diapositivas en Power Point® para cada capítulo, disponibles en el CD-ROM anexo

Características

- Cada capítulo inicia con un esquema de los temas a tratar, los objetivos del capítulo, una lista de términos clave, una referencia al sitio Web y una pequeña introducción.
- Cada sección comienza con una introducción y sus objetivos
- El apartado *Una aplicación de circuito* al final de la mayor parte de los capítulos
- Abundantes ilustraciones de alta calidad
- Biografías cortas de personajes clave en la historia de la electricidad
- *Notas de seguridad* localizadas en puntos apropiados a lo largo del texto e identificadas mediante un logotipo especial
- Gran cantidad de ejemplos resueltos
- Un Problema relacionado en cada ejemplo resuelto con sus respuestas al final del capítulo
- Repasos de sección con respuestas al final del capítulo

- La sección *Localización de fallas* a lo largo de todo el libro.
- Un Resumen al final de cada capítulo.
- Los Términos clave se definen al concluir cada capítulo y aparecen también en el glosario general del libro.
- Una Lista de fórmulas al finalizar cada capítulo.
- Autoevaluación y Respuestas por capítulo.
- Un Examen de dinámica de circuitos que pone a prueba la comprensión del estudiante de lo que sucede en un circuito a consecuencia de ciertos cambios o fallas. Las respuestas se dan al final del capítulo.
- Un conjunto de problemas seccionado en cada capítulo: los más difíciles señalados mediante un asterisco. Las respuestas a problemas de número impar aparecen al final del libro.
- Un glosario general con las definiciones de todos los términos clave y los resaltados en negritas en el texto.
- El libro utiliza el sentido convencional de la corriente. (Una versión alterna de este texto utiliza la dirección del flujo de electrones).

Recursos adicionales para el estudiante

CD-ROM Multisim®: este CD (totalmente en inglés), incluido en cada libro, contiene una serie de archivos de circuito Multisim citados en el texto; muchos de ellos contienen fallas ocultas. Todos estos archivos vienen en el CD-ROM en Multisim 2001®, Multisim 7® y Multisim 8®. Los archivos de versiones actualizadas de Multisim aparecerán en el sitio Web *www.pearsoneducacion.net/floyd* conforme el fabricante, Electronics Workbench, vaya desarrollándolas.

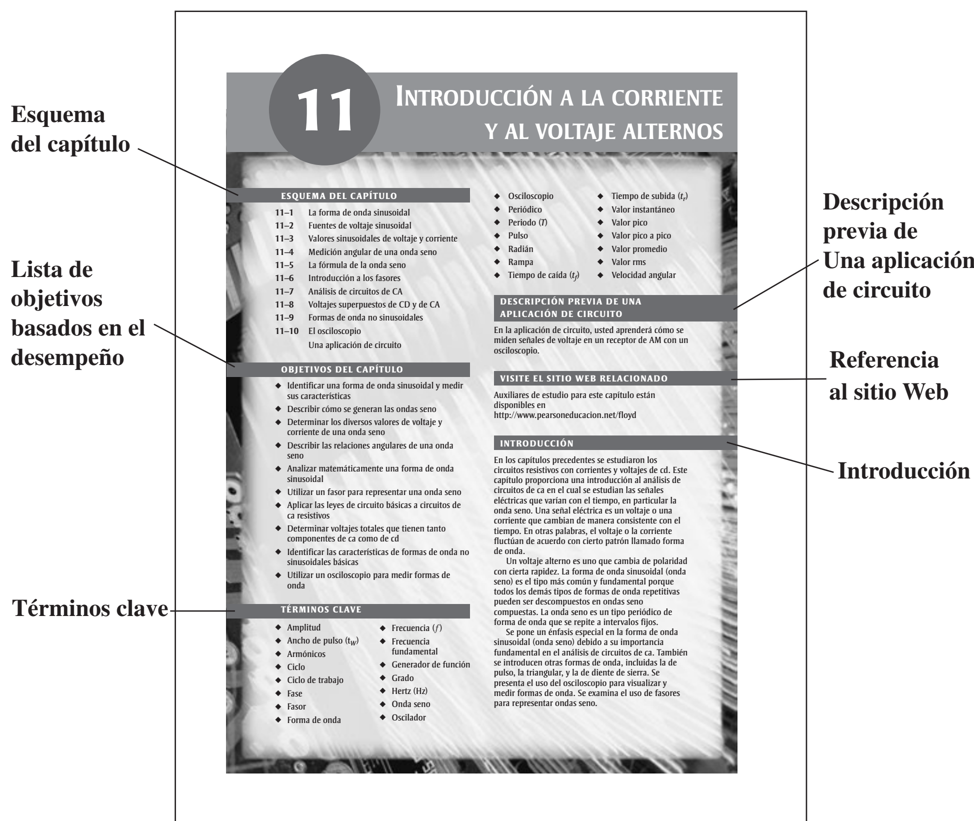
Estos archivos Multisim se proporcionan para ser utilizados por cualquier usuario que posea programas de cómputo Multisim. Quien no tenga estos programas y desee adquirirlos podrá solicitarlos en *www.prenhall.com/ewb*. Sin embargo, aun cuando los archivos de circuito han sido creados para complementar lo expuesto en el salón de clases, en el libro de texto y en el laboratorio, no son indispensables para estudiar los circuitos de cd y ca, ni para el desarrollo de este libro.

Sitio Web del libro (www.pearsoneducacion.net/floyd): este sitio Web, también en inglés, ofrece al estudiante la oportunidad de comprobar su propio progreso y responder preguntas de exámenes muestra.

Recursos para el instructor (en inglés)

Para tener acceso a los materiales complementarios en línea, los instructores deben obtener una contraseña. Vaya a **www.prenhall.com**, haga clic en el vínculo **Instructor Resource Center**, y luego en **Register**, para registrarse y obtener la contraseña de acceso de instructor. Dentro de las 48 horas siguientes, recibirá un correo electrónico de confirmación incluyendo la contraseña solicitada. Una vez que la tenga en su poder, ingrese al sitio e inicie una sesión para recibir instrucciones completas sobre cómo bajar los materiales que desee utilizar.

Diapositivas en Power Point® Un juego completamente nuevo de innovadoras diapositivas en Power Point®, creado por David M. Buchla, ilustra dinámicamente los conceptos clave presentados en el texto. Cada diapositiva contiene un resumen con ejemplos, definiciones de términos clave, y un examen para cada capítulo. Ésta es una herramienta excelente para efectuar una presentación en el salón de clases como complemento del libro de texto. Otra carpeta de diapositivas incluye todas las figuras del texto a todo color, lo que le resultará muy útil. Todo este material está disponible en Internet.



11 INTRODUCCIÓN A LA CORRIENTE Y AL VOLTAJE ALTERNOS

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

11–1 La forma de onda sinusoidal
11–2 Fuentes de voltaje sinusoidal
11–3 Valores sinusoidales de voltaje y corriente
11–4 Medición angular de una onda seno
11–5 La fórmula de la onda seno
11–6 Introducción a los fasores
11–7 Análisis de circuitos de CA
11–8 Voltajes superpuestos de CD y de CA
11–9 Formas de onda no sinusoidales
11–10 El osciloscopio
Una aplicación de circuito

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Identificar una forma de onda sinusoidal y medir sus características
- Describir cómo se generan las ondas seno
- Determinar los diversos valores de voltaje y corriente de una onda seno
- Describir las relaciones angulares de una onda seno
- Analizar matemáticamente una forma de onda sinusoidal
- Utilizar un fasor para representar una onda seno
- Aplicar las leyes de circuito básicas a circuitos de ca resistivos
- Determinar voltajes totales que tienen tanto componentes de ca como de cd
- Identificar las características de formas de onda no sinusoidales básicas
- Utilizar un osciloscopio para medir formas de onda

TÉRMINOS CLAVE

- Amplitud
- Ancho de pulso (t_W)
- Armónicos
- Ciclo
- Ciclo de trabajo
- Fase
- Fasor
- Forma de onda
- Frecuencia (f)
- Frecuencia fundamental
- Generador de función
- Grado
- Hertz (Hz)
- Onda seno
- Oscilador
- Osciloscopio
- Periódico
- Periodo (T)
- Pulso
- Radián
- Rampa
- Tiempo de caída (t_f)
- Tiempo de subida (t_r)
- Valor instantáneo
- Valor pico
- Valor pico a pico
- Valor promedio
- Valor rms
- Velocidad angular

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, usted aprenderá cómo se miden señales de voltaje en un receptor de AM con un osciloscopio.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En los capítulos precedentes se estudiaron los circuitos resistivos con corrientes y voltajes de cd. Este capítulo proporciona una introducción al análisis de circuitos de ca en el cual se estudian las señales eléctricas que varían con el tiempo, en particular la onda seno. Una señal eléctrica es un voltaje o una corriente que cambian de manera consistente con el tiempo. En otras palabras, el voltaje o la corriente fluctúan de acuerdo con cierto patrón llamado forma de onda.

Un voltaje alterno es uno que cambia de polaridad con cierta rapidez. La forma de onda sinusoidal (onda seno) es el tipo más común y fundamental porque todos los demás tipos de formas de onda repetitivas pueden ser descompuestos en ondas seno compuestas. La onda seno es un tipo periódico de forma de onda que se repite a intervalos fijos.

Se pone un énfasis especial en la forma de onda sinusoidal (onda seno) debido a su importancia fundamental en el análisis de circuitos de ca. También se introducen otras formas de onda, incluidas la de pulso, la triangular, y la de diente de sierra. Se presenta el uso del osciloscopio para visualizar y medir formas de onda. Se examina el uso de fasores para representar ondas seno.

▲ **FIGURA P–1**

Apertura de capítulo típica.

Manual de recursos para el instructor Incluye soluciones a problemas de cada capítulo, a las secciones *Una aplicación de circuito* (A Circuit Application), un archivo de examen, un archivo de circuito Multisim resumido, y soluciones a ambos manuales de laboratorio. Disponible en el sitio Web.

Prentice Hall Test Gen Es un banco de exámenes computarizado, disponible en línea.

Ilustración de las características de los capítulos

Apertura de capítulo Cada capítulo comienza como se muestra en la figura P-1. Cada apertura de capítulo incluye número y título de éste, las secciones del texto y objetivos del capítulo, una lista de términos clave, descripción previa de *Una aplicación de circuito*, referencia a una sección del sitio Web y una breve introducción.

Apertura de sección Cada sección incluida en un capítulo inicia con una breve introducción que describe el tema en general y los objetivos. La figura P-2 muestra un ejemplo.

Repaso de sección Cada sección concluye con un repaso, consistente en preguntas o ejercicios que resaltan los principales conceptos estudiados. La parte superior de la figura P-2 muestra un ejemplo. Al final del capítulo se dan las respuestas correspondientes.

Ejemplos resueltos y problemas relacionados A lo largo de cada capítulo, numerosos ejemplos resueltos sirven para ilustrar y aclarar conceptos básicos o procedimientos específicos. Cada ejemplo finaliza con un *Problema relacionado* que refuerza o amplía el ejemplo al requerir que el estudiante resuelva otro problema similar. Los ejemplos seleccionados incluyen un ejercicio de circuito Multisim. La figura P-3 muestra un ejemplo resuelto típico y su Problema relacionado.

▶ **FIGURA P–2**

Apertura típica y repaso de una sección.

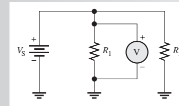
Cada sección concluye con preguntas de repaso

Cada sección inicia con un párrafo introductorio

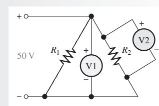
Objetivos de la sección basados en el desempeño

REPASO DE LA SECCIÓN 6-2

1. Un resistor de 10 Ω y uno de 22 Ω están conectados en paralelo a una fuente de 5 V. ¿Cuál es el voltaje a través de cada uno de los resistores?
2. En la figura 6-10 está conectado un voltímetro a través de R_1. El voltímetro lee 118 V. Si usted lo cambia de lugar y lo conecta a través de R_2, ¿cuánto voltaje indicará? ¿Cuál es el voltaje de fuente?
3. En la figura 6-11, ¿cuánto voltaje indica el voltímetro 1? ¿El voltímetro 2?
4. ¿Cómo están relacionados los voltajes a través de cada rama de un circuito en paralelo?



▲ FIGURA 6–10



▲ FIGURA 6–11

6–3 LEY DE LAS CORRIENTES DE KIRCHHOFF

La ley del voltaje de Kirchhoff se ocupa de los voltajes presentes en una sola trayectoria cerrada. La ley de la corriente de Kirchhoff es aplicable a corrientes que circulan por múltiples trayectorias.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar la ley de las corrientes de Kirchhoff**
  - Enunciar la ley de las corrientes de Kirchhoff
  - Definir el término *nodo*
  - Determinar la corriente total sumando las corrientes de cada rama
  - Determinar una corriente desconocida que circula por una rama

La **ley de las corrientes de Kirchhoff**, abreviada a menudo como KCL, por sus siglas en inglés, puede ser enunciada como sigue:

La suma de las corrientes que entran a un nodo (corriente total de entrada) es igual a la suma de las corrientes que salen de dicho nodo (corriente total de salida).

Un **nodo** es cualquier punto o unión en un circuito donde dos o más componentes están conectados. En un circuito en paralelo, un nodo o unión es un punto donde se juntan las ramas dispuestas en paralelo. Por ejemplo, en el circuito de la figura 6-12, el punto *A* es un nodo y el punto *B* otro nodo. Inicie en la terminal positiva de la fuente y siga la corriente. La corriente total I_T que viene de la fuente *entra* al nodo *A*. En este punto, la corriente se divide entre las tres ramas como se indica. Cada una de las tres corrientes de rama (I_1, I_2 e I_3) *sale* del nodo *A*. La ley de las corrientes de Kirchhoff establece que la corriente total que entra al nodo *A* es igual a la corriente total que sale del nodo *A*; es decir,

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

Ahora, cuando se siguen las corrientes mostradas en la figura 6-12 a través de las tres ramas, se advierte que regresan al nodo *B*. Las corrientes I_1, I_2 e I_3 se encuentran en el nodo *B* e I_T sale

▶ **FIGURA P–3**

Ejemplo resuelto típico y su Problema relacionado.

Los ejemplos se ponen aparte del texto

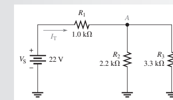
Cada ejemplo contiene un Problema relacionado pertinente al ejemplo

Los ejemplos seleccionados hacen referencia a un archivo de circuito Multisim relacionado

Corrientes de rama

Con la fórmula del divisor de corriente, la ley de la corriente de Kirchhoff, la ley de Ohm, o mediante combinaciones de éstas, se puede calcular la corriente en cualquier rama de un circuito en serie-paralelo. En algunos casos, posiblemente se requiera la aplicación repetida de la fórmula para encontrar una corriente dada. Los dos ejemplos siguientes ayudarán a entender el procedimiento. (Observe que los subíndices para las variables de corriente (I) concuerdan con los subíndices de R; por ejemplo, la corriente a través de R_1 se designa como I_1.)

EJEMPLO 7–8 Encuentre la corriente a través de R_2 y de R_3 en la figura 7-19.



▲ FIGURA 7–19

Solución En primer lugar, identifique la relación serie-paralelo. A continuación, determine cuánta corriente entra al nodo *A*. Ésta es la corriente total. Para determinar I_T, se debe conocer R_T.

$$R_T = R_1 + \frac{R_2R_3}{R_2 + R_3} = 1.0\,k\Omega + \frac{(2.2\,k\Omega)(3.3\,k\Omega)}{2.2\,k\Omega + 3.3\,k\Omega} = 1.0\,k\Omega + 1.32\,k\Omega = 2.32\,k\Omega$$

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{22\,V}{2.32\,k\Omega} = 9.48\,mA$$

Para determinar la corriente a través de R_2, aplique la regla del divisor de corriente para dos ramas como se dio en el capítulo 6.

$$I_2 = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)I_T = \left(\frac{3.3\,k\Omega}{5.5\,k\Omega}\right)9.48\,mA = \mathbf{5.69\,mA}$$

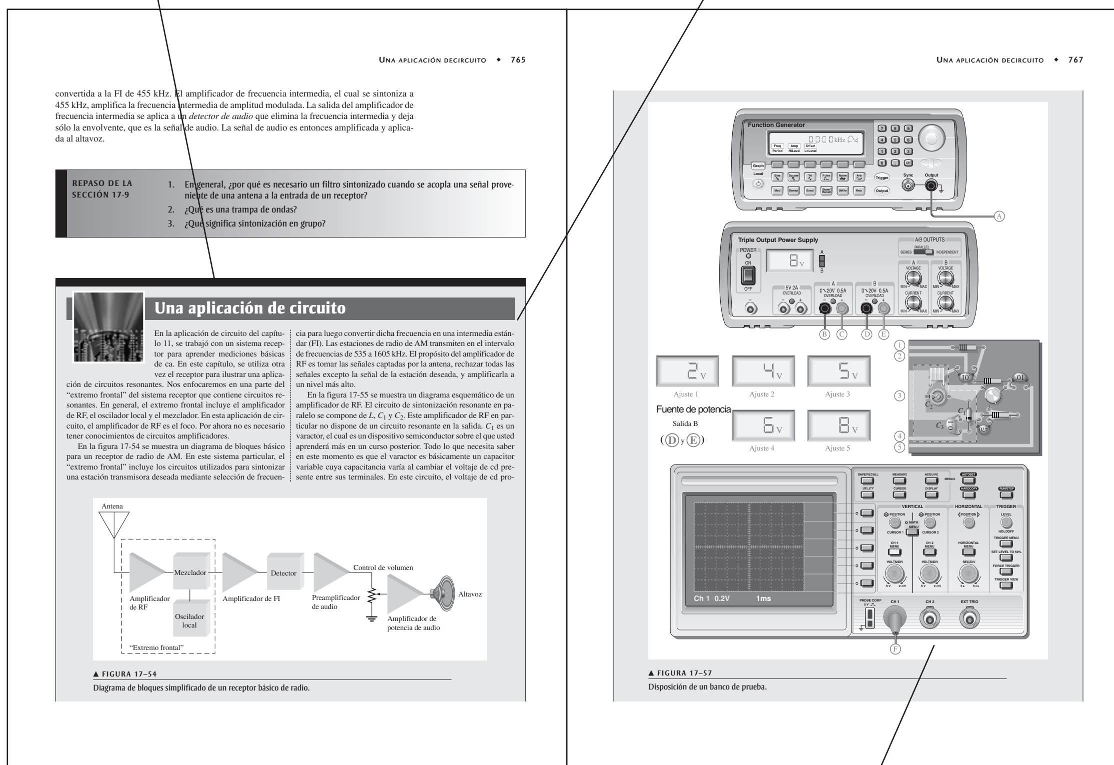
Ahora aplique la ley de la corriente de Kirchhoff para determinar la corriente a través de R_3.

$$I_T = I_2 + I_3$$
$$I_3 = I_T - I_2 = 9.48\,mA - 5.69\,mA = \mathbf{3.79\,mA}$$

Problema relacionado Se conecta un resistor de 4.7 kΩ en paralelo con R_3 en la figura 7-19. Determine la corriente a través del nuevo resistor.



Use el archivo Multisim E07-08 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.



▲ FIGURA P–4

Parte de *Una aplicación de circuito* típica.

Secciones de Localización de fallas Muchos capítulos incluyen una sección de *Localización de fallas* relacionada con los temas tratados en el capítulo y que pone de relieve el razonamiento lógico, así como un método estructurado llamado APM (análisis, planificación y medición) en los casos en que es aplicable. Cuando se considera apropiado, se aplican métodos particulares para la reparación de fallas, tales como división a la mitad.

Una aplicación de circuito Esta sección especial al final de cada capítulo (excepto en Caps. 1 y 21) presenta una aplicación práctica de algunos temas estudiados en el capítulo. Cada una de estas aplicaciones incluye una serie de actividades, muchas de las cuales implican comparar diseños de tarjetas de circuito con esquemas, analizar circuitos utilizando mediciones para determinar su operación y, en algunos casos, desarrollar procedimientos de prueba simples. Los resultados y las respuestas se encuentran en el Manual de recursos para el instructor. La figura P-4 ilustra una parte representativa de la sección *Una aplicación de circuito*.

Material al final de cada capítulo Los siguientes elementos pedagógicos se encuentran al término de cada capítulo:

- Resumen
- Glosario de términos clave
- Lista de fórmulas
- Autoevaluación
- Examen de dinámica de circuitos
- Problemas

- Respuestas a repasos de sección, problemas relacionados con ejemplos, autoevaluación, y al examen de dinámica de circuitos

Sugerencias para la enseñanza con el libro *Principios de circuitos eléctricos*

Énfasis en el curso seleccionado y flexibilidad del texto Este libro de texto está diseñado principalmente para usarse en un curso de dos semestres, en el cual los temas de corriente directa (Caps. 1 a 10) se imparten durante el primer semestre y los de corriente alterna (Caps. 11 a 21) en el segundo semestre. Estructurar un curso de un semestre que abarque los temas de ca y cd es posible, pero requeriría de una cobertura muy selectiva y abreviada de muchos temas.

Si las limitaciones de tiempo o el énfasis en el curso restringen los temas que pueden ser cubiertos, como casi siempre ocurre, existen varias opciones para efectuar una cobertura selectiva. Las siguientes sugerencias para el caso de un tratamiento ligero o alguna omisión no necesariamente implican que cierto tema sea menos importante que otros, sino que, en el contexto de un programa específico, es probable que éste no requiera la atención impuesta a los temas fundamentales. Como el énfasis en el curso, el nivel y el tiempo disponible varían de un programa a otro, la omisión o el tratamiento abreviado de temas seleccionados puede efectuarse sobre una base individual. Por lo tanto, las siguientes sugerencias están formuladas sólo como guía general.

1. Capítulos que pueden ser considerados para omisión o cobertura selectiva:
   - Capítulo 8, Teoremas de circuitos y conversiones
   - Capítulo 9, Análisis de ramas, lazos y nodos
   - Capítulo 10, Magnetismo y electromagnetismo
   - Capítulo 18, Filtros pasivos
   - Capítulo 19, Teoremas de circuitos en análisis de CA
   - Capítulo 20, Respuesta en función del tiempo de circuitos reactivos
   - Capítulo 21, Sistemas trifásicos en aplicaciones de potencia
2. Las secciones de *Una aplicación de circuito* y *Localización de fallas* pueden ser omitidas sin afectar otro material.
3. Otros temas específicos pueden ser omitidos o cubiertos ligeramente sección por sección a criterio del instructor.

El orden en el cual ciertos temas aparecen en el texto puede ser modificado a criterio del instructor. Por ejemplo, los temas sobre capacitores e inductores (Caps. 12 y 13) pueden ser cubiertos al final del curso de corriente directa, en el primer semestre, retrasando la cobertura de los temas de corriente alterna incluidos en las secciones 12-6, 12-7, 13-5, y 13-6 hasta el curso de corriente alterna, en el segundo semestre. Otra posibilidad es cubrir los capítulos 12 y 13 en el segundo semestre, pero el capítulo 15 (Circuitos *RC*) inmediatamente después del 12 (Capacitores), y el 16 (Circuitos *RL*) enseguida del 13 (Inductores).

Una aplicación de circuito Estas secciones son útiles para motivar y para introducir aplicaciones de conceptos y componentes básicos. Las siguientes son sugerencias sobre cómo utilizar estas secciones:

- Como parte integral del capítulo para ilustrar las posibilidades de aplicación de los conceptos y componentes en una situación práctica. Las actividades pueden ser asignadas como tarea.
- Como asignaciones de créditos extra.
- Como actividades en clase para promover el análisis y la interacción y ayudar a los estudiantes a entender por qué necesitan conocer el material.

Cobertura de circuitos reactivos Los capítulos 15, 16 y 17 fueron diseñados para proporcionar dos métodos de enseñanza de estos temas sobre circuitos reactivos.

La primera alternativa es cubrir los temas con base en los componentes. Esto es, estudiar primero todo el capítulo 15 (Circuitos *RC*), acto seguido todo el capítulo 16 (Circuitos *RL*), y, por último, todo el capítulo 17 (Circuitos *RLC* y resonancia).

La segunda alternativa es cubrir los temas con base en el tipo de circuito. Es decir, primero estudiar todos los temas relacionados con circuitos reactivos en serie, luego todos los temas de circuitos reactivos en paralelo, y, por último, todos los temas que se refieren a circuitos reactivos en serie-paralelo. Para facilitar este segundo método, cada capítulo está dividido en las siguientes partes: *Parte 1: Circuitos en serie*, *Parte 2*: *Circuitos en paralelo*, *Parte 3*: *Circuitos en serie-paralelo,* y *Parte 4*: *Temas especiales*. Por lo tanto, para circuitos reactivos en serie, se cubre la Parte 1 de los tres capítulos en secuencia. Para circuitos reactivos en paralelo, la Parte 2 de los tres capítulos en forma sucesiva. En el caso de circuitos reactivos en serie-paralelo, cubra la Parte 3 de los tres capítulos en secuencia. Finalmente, estudie la Parte 4 de los tres capítulos.

Para el estudiante

Cualquier carrera demanda trabajo duro, la de electrónica no es excepción. La mejor manera de aprender un material nuevo es leyendo, pensando y realizando. Este texto está diseñado para ayudarle a lo largo de todo el camino ya que proporciona las generalidades y los objetivos de cada sección, numerosos ejemplos resueltos, ejercicios, y preguntas de repaso.

Lea cada sección del texto con cuidado y medite lo que ha leído. Es posible que ocasionalmente necesite leer la sección más de una vez. Resuelva cada problema de ejemplo paso a paso antes de abordar el problema relacionado. Después de cada sección responda las preguntas de repaso. Las respuestas a los problemas relacionados y las preguntas de repaso de sección se encuentran al final del capítulo.

Repase el resumen del capítulo, las definiciones de los términos clave y la lista de fórmulas. Realice la autoevaluación de opción múltiple y el examen de dinámica de circuitos. Verifique sus respuestas contra las que aparecen al final del capítulo. Por último, resuelva los problemas. La resolución de problemas es la manera más efectiva de verificar su comprensión y consolidar los conceptos. Compruebe sus respuestas a los problemas de numeración impar con las proporcionadas al final del libro.

Carreras de electrónica

El campo de la electrónica es muy diverso, y las oportunidades de hacer carrera están disponibles en muchas áreas. Dado que en la actualidad la electrónica se encuentra en tantas aplicaciones diferentes, y nueva tecnología está siendo desarrollada a un ritmo extremadamente rápido, su futuro parece ilimitado. Difícilmente podría señalarse un área de nuestras vidas que no haya sido mejorada en cierto grado por la tecnología electrónica. Quienes adquieran un conocimiento sólido, básico, de los principios eléctricos y electrónicos y deseen continuar aprendiendo siempre estarán en demanda.

La importancia de alcanzar un completo entendimiento de los principios básicos contenidos en este texto no puede ser sobreestimada. La mayoría de los empleadores prefiere contratar personal que posea tanto fundamentos sólidos como capacidad y deseo de aprender técnicas y conceptos nuevos. Si usted está bien preparado en lo fundamental, cualquier empleador lo capacitará en los puntos específicos del trabajo al cual sea asignado.

Existen muchos tipos de clasificaciones laborales para los que una persona con entrenamiento en electrónica puede calificar. Algunas de las funciones de trabajo más comunes se describen con brevedad en los párrafos siguientes.

Técnico de taller de servicio En esta categoría, el personal técnico interviene en la reparación o el ajuste de equipo electrónico tanto comercial como doméstico que es regresado al distribuidor o fabricante para servicio. Algunas áreas específicas incluyen televisiones, videocaseteras, reproductores de CD y DVD, equipo estéreo, radios de banda civil y computadoras. Esta área también ofrece oportunidades de autoempleo.

Técnico en manufactura industrial El personal de manufactura participa en la evaluación de productos electrónicos al nivel de línea de ensamble, o en el mantenimiento y la reparación de fallas de sistemas electrónicos y electromecánicos utilizados en la evaluación y manufactura de productos. Casi todo tipo de planta de manufactura, sin importar su producto, utiliza equipo automático electrónicamente controlado.

Técnico laboratorista Estos técnicos intervienen en la creación de tarjetas experimentales, prototipos y evaluación de sistemas electrónicos nuevos o modificados en laboratorios de investigación y desarrollo. En general, trabajan codo a codo con los ingenieros en la fase de desarrollo de un producto.

Técnico de servicio de campo El personal de servicio de campo da servicio y repara equipo electrónico, por ejemplo, sistemas de computación, instalaciones de radar, equipo automático de operaciones bancarias y sistemas de seguridad —en las instalaciones del usuario.

Asistente de ingeniería/Ingeniero asociado El personal ubicado en esta categoría trabaja estrechamente con los ingenieros en la implementación de un concepto y en el diseño y desarrollo básicos de sistemas electrónicos. Los asistentes de ingeniería con frecuencia intervienen en un proyecto desde su diseño inicial hasta las primeras etapas de manufactura.

Escritor técnico Los escritores técnicos recopilan información y luego la utilizan para escribir y producir manuales y material audiovisual. Un conocimiento amplio de un sistema en particular y la capacidad de explicar con claridad sus principios y operación resultan esenciales.

Ventas técnicas Las personas técnicamente entrenadas son demandadas como representantes de ventas de productos de alta tecnología. La habilidad tanto para entender conceptos técnicos de un producto como para comunicarlos a un cliente potencial es muy valiosa. En esta área, igual que en la anterior, ser competente en la expresión oral y escrita es esencial. En realidad, tener la habilidad para comunicarse bien es muy importante en cualquier trabajo técnico porque se debe ser capaz de registrar datos con claridad y de explicar procedimientos, conclusiones y acciones emprendidas de modo que otros puedan entender lo que se está haciendo.

Eventos significativos en el campo de la electrónica

Antes de iniciar el estudio de circuitos eléctricos, daremos un vistazo a algunos de los importantes desarrollos que condujeron a la tecnología electrónica de la actualidad. Los nombres de muchos de los pioneros en el campo de la electricidad y la electromagnética aún persisten en términos de unidades y cantidades conocidas. Nombres como Ohm, Ampere, Volta, Farad, Henry, Coulomb, Oersted, y Hertz son algunos de los ejemplos mejor conocidos. Otros más ampliamente conocidos, tales como Franklin y Edison, también resultan significativos en la historia de la electricidad y la electrónica debido a sus extraordinarias contribuciones. Biografías cortas de algunos de estos pioneros, como la aquí mostrada, se encuentran en todo el texto.

BIOGRAFÍA



Georg Simon Ohm
1787–1854

Ohm nació en Bavaria y luchó por años para que le fuese reconocido su trabajo en la formulación de la relación de corriente, voltaje y resistencia. Esta relación matemática se conoce hoy en día como la ley de Ohm, y la unidad de resistencia fue nombrada ohm en su honor. (Crédito de la fotografía: Biblioteca del Congreso estadounidense, LC-USZ62-40943.)

El inicio de la electrónica Los primeros experimentos con la electrónica implicaron corrientes eléctricas en tubos de vacío. Heinrich Geissler (1814-1879) extrajo la mayor parte del aire contenido en un tubo de vidrio y encontró que el tubo brillaba cuando era atravesado por una corriente. Posteriormente, Sir William Crookes (1832-1919) se dio cuenta de que en tubos de vacío la corriente parecía estar compuesta por partículas. Thomas Edison (1847-1931) experimentó con bulbos de filamento de carbón con placas y descubrió que había una corriente del filamento caliente hacia una carga positivamente cargada. Patentó la idea pero nunca la utilizó.

Otros precursores de la experimentación midieron las propiedades de las partículas que fluían en tubos de vacío. Sir Joseph Thompson (1856-1940) midió las propiedades de estas partículas, llamadas más tarde *electrones*.

Aunque la comunicación telegráfica inalámbrica se remonta a 1844, la electrónica es básicamente un concepto del siglo XX, que se inició con la invención del amplificador de tubo de vacío. En 1904, John A. Fleming construyó un tubo de vacío que permitía el flujo de corriente en una sola dirección. Llamado válvula Fleming, fue el precursor de los diodos de tubos de vacío. En 1907, Lee deForest agregó una rejilla al tubo de vacío. El nuevo artefacto, llamado audiotrón, podía amplificar una señal débil. Al agregar el elemento de control, deForest se colocó a la vanguardia de la revolución electrónica. Gracias a una versión mejorada de su artefacto los servicios de telefonía transcontinental y de radio fueron posibles. En 1912 en San José, California, ¡un radio aficionado transmitía música con regularidad!

En 1921 el secretario de comercio estadounidense, Herbert Hoover, expidió la primera licencia para una estación de radio; al cabo de dos años más de 600 licencias fueron expedidas. A finales de los años de 1920 en muchos hogares ya había aparatos de radio. Un nuevo tipo de radio, el superheterodino, inventado por Edwin Armstrong, resolvió los problemas que se presentaban con

la comunicación de alta frecuencia. En 1923 Vladimir Zworykin, un investigador estadounidense, inventó el primer tubo de imagen de televisión, y en 1927 Philo T. Farnsworth solicitó una patente para un sistema de televisión completo.

La década de 1930 contempló muchos desarrollos en la radio, incluyendo los tubos metálicos, el control de ganancia automático, "miniaparatos" (de radio), antenas direccionales y más. En esta década también se inició el desarrollo de las primeras computadoras electrónicas. Las computadoras modernas remontan sus orígenes al trabajo de John Atanasoff en Iowa State University. Comenzando en 1937, ideó una máquina binaria que podía realizar trabajos matemáticos complejos. En 1939, Atanasoff y el estudiante graduado Clifford Berry construyeron una máquina binaria llamada ABC (por Atanasoff-Berry Computer) que utilizaba tubos de vacío para la lógica y condensadores (capacitores) para memoria. En 1939, el magnetrón, un oscilador de microondas, fue inventado en Inglaterra por Henry Boot y John Randall. En el mismo año, el tubo de microondas klistrón fue inventado en Estados Unidos por Russell y Sigurd Varian.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la electrónica se desarrolló con rapidez. El magnetrón y el klistrón hicieron posible la fabricación del radar y la comunicación de muy alta frecuencia. Los tubos de rayos catódicos fueron mejorados para utilizarse en sistemas de radar. El desarrollo de la computadora continuó durante la guerra. En 1946, John von Neumann desarrolló la primera computadora capaz de guardar programas, la ENIAC, en la Universidad de Pennsylvania. La década finalizó con una de las invenciones más importantes que alguna vez se haya realizado: el transistor.

Electrónica de estado sólido Los detectores de cristal utilizados en los primeros aparatos de radio fueron los precursores de los modernos instrumentos de estado sólido. Sin embargo, la era de la electrónica de estado sólido comenzó con la invención del transistor en 1947 en los laboratorios Bell. Los inventores fueron Walter Brattain, John Bardeen y William Shockley. Las tarjetas de circuito impreso fueron introducidas en 1947, el año en que se inventó el transistor. La fabricación comercial de transistores comenzó en Allentown, Pennsylvania, en 1951.

La inversión más importante en la década de 1950 fue el circuito integrado. El 12 de septiembre de 1958, en Texas Instruments, Jack Kilby realizó el primer circuito integrado. Esta invención literalmente creó la era de la computadora y provocó arrolladores cambios en campos como el de la medicina, las comunicaciones, la manufactura y la industria del entretenimiento. Muchos miles de millones de "chips" —como se los llamó a los circuitos integrados— se han fabricado desde entonces.

La década de 1960 fue testigo del inicio de la carrera espacial y estimuló el desarrollo de la miniaturización y las computadoras. La carrera espacial se constituyó en la fuerza impulsora de los rápidos cambios que siguieron. El primer "amplificador operacional" lo diseñó Bob Widlar en Fairchild Semiconductor en 1965. Llamado μA709, resultó muy exitoso, pero sufría de "bloqueo" y otros problemas. Más tarde, el amplificador operacional más popular que alguna vez se haya construido, el 741, fue tomando forma en Fairchild. El 741 se convirtió en el estándar de la industria e influyó en el diseño de los amplificadores operacionales de los siguientes años.

Hacia 1971, una nueva compañía que había sido formada por un grupo proveniente de Fairchild introdujo el primer microprocesador. Esta empresa fue Intel y el producto el chip 4004, el cual tenía igual potencia de procesamiento que la computadora Eniac. Posteriormente en el mismo año, Intel dio a conocer el primer procesador de 8 bits, el 8008. En 1975, la primera computadora personal fue introducida por Altair, y apareció en la portada del número de enero de 1975 de la revista Popular Science. La década de 1970 también atestiguó la introducción de la calculadora de bolsillo y de nuevos desarrollos de circuitos ópticos integrados.

Durante la década de 1980, la mitad de los hogares estadounidenses utilizaba conexiones de cable en lugar de antenas de televisión. La confiabilidad, velocidad y miniaturización de artefactos electrónicos continuó, incluyendo la evaluación y calibración automáticas de tarjetas de circuito impreso. La computadora se convirtió en parte de la instrumentación y fue creado el objeto virtual. La computadoras devinieron en el estándar en el banco de trabajo.

Los años de la década de 1990 atestiguaron la amplia aplicación de Internet. En 1993 había 130 sitios Web; ahora hay millones. Las compañías se peleaban por establecer una página de inicio y muchos de los primeros desarrollos de transmisión radial ocurrieron en paralelo con Internet. En 1995, la FCC asignó espacio espectral para un nuevo servicio llamado Servicio de Radio de Audio Digital (Digital Audio Radio Service). Hacia 1996, la FCC adoptó estándares de televisión digital para la siguiente generación de transmisiones televisivas.

El siglo XXI vio la luz en enero de 2001. Uno de los episodios de tecnología más importante ha sido el continuo y explosivo crecimiento de Internet. En Estados Unidos, su uso se ha incrementado en más del 100% desde el 2000 hasta el 2005. El resto del mundo experimentó un crecimiento de casi el 200% durante el mismo periodo. La velocidad de procesamiento de las computadoras está aumentando a un ritmo constante, y la capacidad de los medios de almacenamiento de datos avanza a un paso asombroso. Se prevé que los nanotubos de carbón van a ser el siguiente paso para los microcircuitos de computadora, y con el tiempo van a reemplazar la tecnología del transistor.

Reconocimientos

Muchas personas talentosas han intervenido en la revisión de este libro: *Principios de circuitos eléctricos*. Fue examinado y verificado a cabalidad en lo que concierne tanto a contenido como a precisión. En Prentice Hall muchas personas contribuyeron en gran medida para la realización de este proyecto a lo largo de las muchas fases de desarrollo y producción, entre ellas Rex Davidson y Kate Linsner, Lois Porter, cuya atención a los detalles es increíble, una vez más realizó un notable trabajo de edición del manuscrito. Jane Lopez aportó de nuevo las excelentes ilustraciones y el hermoso trabajo gráfico utilizados en el texto. David Buchla contribuyó con una cantidad importante de material para esta revisión y emitió muchas recomendaciones. Igual que en la edición previa, Gary Znyder creó los archivos de circuito para las funciones Multisim incluidas en esta edición.

Deseo expresar mi agradecimiento a los ya mencionados, así como a quienes ofrecieron valiosas sugerencias y críticas constructivas que ejercieron una gran influencia en este libro de texto. Las siguientes personas actuaron como revisores y proporcionaron una retroalimentación perspicaz para esta edición: Eldon E. Brown Jr., Cape Fear Community College; Montie Fleshman, New River Community College; James Jennings, Community College of Southern Nevada; Ronald J. LaSpisa, University of Oklahoma; E. Ed Margaff, Marion Technical College; David Misner, Hutchinson Community College, y Gerald Schickman, Miami Dade Community College. Un agradecimiento especial para David Heiserman por su amplia evaluación del texto.

Otros instructores que utilizan la edición previa contribuyeron significativamente con su participación en una encuesta en línea.

Hamid Allamehzadeh ENMU
Tim Baker John A. Logan College
Walter Banzhaf University of Hartford
Joseph Baumert NICC
Kenneth D. Belk Marion Technical College
Seddik Benhamida DeVry University
Rick Buffaloe Idaho State University
Robert Cannella Jr. College of DuPage
Ken Carpenter University of New Mexico
Dan Celenti NYCCT
James Diehl Del Mar College
James Dunn Boise State University
Anthony Edwards Rockingham Community College
Tom Eppes University of Hartford
Larry Gazaway Spokane Community College
David Grant Renton Technical College
Mark Gray Cape Fear Community College
Victor Greenwood Northwest Technical Institute
Osman Gurdal JCSU
Joshua Guttman Bergen Community College
Robert Heffner North Harris College
Christopher Henggeler Westwood College
H. Randolph Holt Northern Kentucky University
Andy Huertaz Albuquerque TVI
Mark Hughes Cleveland Community College
Osama Hussein New York City College of Technology
James Jazdzewski Gateway Technical College
David Jones Lenoir Community College
Benjamin Jun Ivy Tech State College
Lynn Kelly New Mexico State University
Ron LaSpisa U of Oklahoma
George Lee Massasoit Community College
Erik Mayer Bowling Green State University
Paul Mayer Eastern Maine Community College
Stan Middlebrooks Herzing College
Dave Misner Hutchinson Community College
Jim Nutt NMSU-A
Larry Patterson Belmont Technical College
David Phillips Linn State Technical College
James Reardon New England Institute of Technology
Rick Reardon Eastern Maine Community College
Steven Rice C.O.T. University of Montana
Bob Romano Cincinnati Technical and Community College
Jimmie Russell DeVry University
Manavi Sallick Miami Dade College
Joseph Santaniello Spartanburg Technical College
Robert Scoff The University of Memphis
S.T. (Tom) Sharar Asheville-Buncombe Technical College
James Smith Central Washington University
James Stack Boise State University
Richard Sturtevant STCC
Tony Suranno Hagerstown Community College
Greg Szepanski Holyoke Community College
Pratap Reddy Talusani Houston Community College
Ralph Tanner Western Michigan University
Calvin Taylor Centralia College
Ron Tinckham Santa Fe Community College
Don Tosh Evangel University
David Tyree Vincennes University
Ramon Vigil TVI
Paul Vonderwell Vincennes University
Harold Wiebe Northern Kentucky University
Steven Wilson Spokane Community College
Venancio Ybarra, Jr. NHMCCD Cy-Fair College
Steve Yelton Cincinnati State Technical and Community College
Tim Yoxtheimer Central Washington University

Tom Floyd

CONTENIDO

CANTIDADES Y UNIDADES 1

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Analizar el estándar SI
- Utilizar notación científica (potencias de diez) para representar cantidades
- Utilizar notación de ingeniería y prefijos métricos para representar cantidades grandes y pequeñas
- Convertir una unidad con prefijo métrico en otra

TÉRMINOS CLAVE

- Exponente
- Notación científica
- Notación de ingeniería
- Potencia de diez
- Prefijo métrico
- SI

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

El lector debe estar familiarizado con las unidades utilizadas en electrónica y saber cómo expresar cantidades eléctricas en diversas formas por medio de prefijos métricos. Las notaciones científica y de ingeniería son herramientas indispensables, ya sea que utilice una computadora, una calculadora o que realice los cálculos a la manera antigua.

NOTA DE SEGURIDAD



Cuando se trabaje con electricidad, siempre debe considerarse primero la seguridad. Notas de seguridad en todo el libro le recuerdan la importancia de la seguridad y proporcionan consejos para tener un lugar de trabajo seguro. En el capítulo 2 se presentan medidas de seguridad básicas.

1–1 UNIDADES DE MEDICIÓN

En el siglo XIX, las principales unidades de medición y peso tenían que ver con el comercio. Conforme avanzó la tecnología, los científicos e ingenieros vislumbraron la necesidad de utilizar unidades internacionales de medición estándar. En 1875, en una conferencia convocada por los franceses, representantes de dieciocho países firmaron un tratado que establecía estándares internacionales. En la actualidad, todos los trabajos de ingeniería y científicos utilizan un sistema internacional de unidades mejorado. El Système International d'Unités, abreviado **SI**.*

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar el estándar SI**
  - Especificar las unidades SI fundamentales
  - Especificar las unidades complementarias
  - Explicar qué son las unidades derivadas

Unidades fundamentales y unidades derivadas

El sistema SI está basado en siete unidades fundamentales (en ocasiones llamadas *unidades base*) y dos unidades complementarias. Todas las mediciones pueden ser expresadas como alguna combinación de unidades fundamentales y complementarias. La tabla 1-1 enumera las unidades fundamentales y la 1-2 las complementarias.

La unidad eléctrica fundamental, el ampere, es la unidad utilizada para medir la corriente eléctrica. La corriente se abrevia con la letra *I* (por intensidad) y utiliza el símbolo *A* (por ampere). El ampere es único en el sentido de que utiliza en su definición a la unidad fundamental de tiempo (*t*) (el segundo). Todas las demás unidades eléctricas y magnéticas (tales como voltaje, potencia y flujo magnético) utilizan varias combinaciones de unidades fundamentales en sus definiciones y se llaman *unidades derivadas*.

Por ejemplo, la unidad de voltaje derivada, que es el volt (V), se define en función de unidades fundamentales como el $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$. Como se puede ver, esta combinación de unidades fundamentales es muy complicada e impráctica. Por consiguiente, se utiliza el volt como unidad derivada.

▶ **TABLA 1–1**
Unidades SI fundamentales.

CANTIDAD	UNIDAD	SÍMBOLO
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Tiempo	Segundo	s
Corriente eléctrica	Ampere	A
Temperatura	Kelvin	K
Intensidad luminosa	Candela	cd
Cantidad de sustancia	Mol	mol

▶ **TABLA 1–2**
Unidades SI suplementarias.

CANTIDAD	UNIDAD	SÍMBOLO
Ángulo plano	Radian	r
Ángulo sólido	Esteradian	sr

***Todos los términos que aparecen en negritas se incluyen en el glosario al final del libro. Los términos que aparecen en gris y en negritas son términos clave y también se definen al final del capítulo.**

Se utilizan símbolos literales para representar tanto cantidades como sus unidades. Se utiliza un símbolo para representar el nombre de la cantidad y otro para identificar la unidad de medición de dicha cantidad. Por ejemplo, *P* representa *potencia* y W *watt*, que es la unidad de potencia. Otro ejemplo es voltaje. En este caso, la misma letra representa tanto la cantidad como su unidad. La *V* cursiva representa el voltaje y la V recta el volt, el cual es la unidad de voltaje. Por lo general, las letras cursivas representan la cantidad y las rectas la unidad de dicha cantidad.

La tabla 1-3 enumera las cantidades eléctricas más importantes, junto con las unidades SI derivadas y sus símbolos. La tabla 1-4 enumera y relaciona las cantidades magnéticas, junto con las unidades SI derivadas y sus símbolos.

CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD SI	SÍMBOLO
Capacitancia	C	Faradio	F
Carga	Q	Coulomb	C
Conductancia	G	Siemens	S
Energía	W	Joule	J
Frecuencia	f	Hertz	Hz
Impedancia	Z	Ohm	Ω
Inductancia	L	Henry	H
Potencia	P	Watt	W
Reactancia	X	Ohm	Ω
Resistencia	R	Ohm	Ω
Voltaje	V	Volt	V

◀ **TABLA 1–3**

Cantidades eléctricas y unidades derivadas con símbolos SI.

CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD SI	SÍMBOLO
Intensidad de campo magnético	H	Ampere vueltas/metro	At/m
Flujo magnético	ϕ	Weber	Wb
Densidad de flujo magnético	B	Tesla	T
Fuerza magnetomotriz	F_m	Ampere-vuelta	At
Permeabilidad	μ	Weber/ampere-vuelta · metro	Wb/At · m
Reluctancia	$\mathcal{R}$	Ampere-vueltas/weber	At/Wb

◀ **TABLA 1–4**

Cantidades magnéticas y unidades derivadas con símbolos SI.

REPASO DE LA SECCIÓN 1-1

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. ¿Cómo difiere una unidad fundamental de una derivada?
2. ¿Cuál es la unidad fundamental eléctrica?
3. ¿Qué significa SI?
4. Sin recurrir a la tabla 1-3, enumere tantas cantidades eléctricas como sea posible, incluidos sus símbolos, unidades, y símbolos de unidad.
5. Sin recurrir a la tabla 1-4, enumere tantas cantidades magnéticas como sea posible, incluidos sus símbolos, unidades, y símbolos de unidad.

1–2 NOTACIÓN CIENTÍFICA

En los campos de la electricidad y la electrónica, se presentan tanto cantidades muy pequeñas como muy grandes. Por ejemplo, es común tener valores de corriente eléctrica de sólo unas cuantas milésimas o incluso de unos cuantos millonésimos de ampere, o tener valores de resistencia hasta de varios miles o millones de ohms.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar notación científica (potencias de diez) para representar cantidades**
  - Expresar cualquier número por medio de una potencia de diez
  - Realizar cálculos con potencias de diez

La **notación científica** proporciona un método conveniente para representar números grandes y pequeños y realizar cálculos que implican tales números. En notación científica, una cantidad se expresa como el producto de un número situado entre 1 y 10 y una potencia de diez. Por ejemplo, la cantidad 150,000 se expresa en notación científica como 1.5×10^5, y la cantidad 0.00022 como 2.2×10^{-4}.

Potencias de diez

La tabla 1-5 enumera algunas potencias de diez, tanto positivas como negativas, y los números decimales correspondientes. La **potencia de diez** se expresa como un exponente de la base 10 en cada caso (10^x). Un **exponente** es un número al cual se eleva un número base. Indica la cantidad de lugares que el decimal se mueve hacia la derecha o a la izquierda para producir el número decimal. Para una potencia positiva de diez, el punto decimal se mueve hacia la derecha para obtener el número decimal equivalente. Por ejemplo, para un exponente de 4,

$$10^4 = 1 \times 10^4 = 1.0000. = 10{,}000$$

Para una potencia negativa de diez, el punto decimal se mueve hacia la izquierda para obtener el número decimal equivalente. Por ejemplo, para un exponente de −4,

$$10^{-4} = 1 \times 10^{-4} = .0001. = 0.0001$$

▼ TABLA 1–5

Algunas potencias de diez positivas y negativas.

$10^6 = 1{,}000{,}000$	$10^{-6} = 0.000001$
$10^5 = 100{,}000$	$10^{-5} = 0.00001$
$10^4 = 10{,}000$	$10^{-4} = 0.0001$
$10^3 = 1{,}000$	$10^{-3} = 0.001$
$10^2 = 100$	$10^{-2} = 0.01$
$10^1 = 10$	$10^{-1} = 0.1$
$10^0 = 1$	

EJEMPLO 1–1 Exprese cada número en notación científica.

(a) 200 **(b)** 5000 **(c)** 85,000 **(d)** 3,000,000

Solución En cada caso, corra el punto decimal un número apropiado de lugares hacia la izquierda para determinar la potencia positiva de diez.

(a) $200 = \mathbf{2 \times 10^2}$ **(b)** $5000 = \mathbf{5 \times 10^3}$

(c) $85{,}000 = \mathbf{8.5 \times 10^4}$ **(d)** $3{,}000{,}000 = \mathbf{3 \times 10^6}$

*Problema relacionado** Exprese 4750 en notación científica.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 1–2 Exprese cada número en notación científica.

(a) 0.2 **(b)** 0.005 **(c)** 0.00063 **(d)** 0.000015

Solución En cada caso, corra el punto decimal un número apropiado de lugares hacia la derecha para determinar la potencia negativa de diez.

(a) $0.2 = \mathbf{2 \times 10^{-1}}$ **(b)** $0.005 = \mathbf{5 \times 10^{-3}}$

(c) $0.00063 = \mathbf{6.3 \times 10^{-4}}$ **(d)** $0.000015 = \mathbf{1.5 \times 10^{-5}}$

Problema relacionado Exprese 0.00738 en notación científica.

EJEMPLO 1–3 Exprese cada uno de los siguientes números como un número decimal regular:

(a) 1×10^5 **(b)** 2×10^3 **(c)** 3.2×10^{-2} **(d)** 2.50×10^{-6}

Solución Corra el punto decimal a derecha o izquierda un número de lugares indicado por la potencia positiva o negativa de diez, respectivamente.

(a) $1 \times 10^5 = \mathbf{100{,}000}$ **(b)** $2 \times 10^3 = \mathbf{2000}$

(c) $3.2 \times 10^{-2} = \mathbf{0.032}$ **(d)** $2.5 \times 10^{-6} = \mathbf{0.0000025}$

Problema relacionado Exprese el número 9.12×10^3 como un número decimal regular.

Cálculos con potencias de diez

La ventaja de la notación científica radica en que permite efectuar las operaciones de adición, sustracción, multiplicación y división de números muy pequeños y muy grandes.

Adición. Los pasos para sumar números presentados en potencias de diez son los siguientes:

1. Expresar los números a ser sumados en la misma potencia de diez.
2. Sumar los números sin sus potencias de diez para obtener la adición.
3. Recuperar la potencia de diez común, la cual es la potencia de diez de la adición.

EJEMPLO 1–4 Sume 2×10^6 y 5×10^7 y exprese el resultado en notación científica.

Solución

1. Exprese ambos números en la misma potencia de diez: $(2 \times 10^6) + (50 \times 10^6)$.
2. Sume $2 + 50 = 52$.
3. Recupere la potencia común de diez (10^6); la suma es $52 \times 10^6 = \mathbf{5.2 \times 10^7}$.

Problema relacionado Sume 3.1×10^3 y 5.5×10^4.

Sustracción Los pasos para restar números presentados en potencias de diez son los siguientes:

1. Expresar los números a ser restados en la misma potencia de diez.
2. Restar los números sin sus potencias de diez para obtener la diferencia.
3. Restaurar la potencia común de diez, la cual es la potencia de diez de la diferencia.

EJEMPLO 1–5 Reste 2.5×10^{-12} de 7.5×10^{-11} y exprese el resultado en notación científica.

Solución

1. Exprese cada número en la misma potencia de diez: $(7.5 \times 10^{-11}) - (0.25 \times 10^{-11})$.
2. Reste $7.5 - 0.25 = 7.25$.
3. Restaure la potencia común de diez (10^{-11}); la diferencia es $\mathbf{7.25 \times 10^{-11}}$.

Problema relacionado Reste 3.5×10^{-6} de 2.2×10^{-5}.

Multiplicación Los pasos para multiplicar números presentados en potencias de diez son los siguientes:

1. Multiplicar los números directamente sin sus potencias de diez.
2. Sumar la potencias de diez algebraicamente (los exponentes no tienen que ser los mismos).

EJEMPLO 1–6 Multiplique 5×10^{12} y 3×10^{-6} y exprese el resultado en notación científica.

Solución Multiplique los números, y sume las potencias algebraicamente.

$$(5 \times 10^{12})(3 \times 10^{-6}) = 15 \times 10^{12+(-6)} = 15 \times 10^6 = \mathbf{1.5 \times 10^7}$$

Problema relacionado Multiplique 3.2×10^6 y 1.5×10^{-3}.

División Los pasos para dividir números presentados en potencias de diez son los siguientes:

1. Dividir los números directamente sin sus potencias de diez.
2. Restar la potencia de diez del denominador de la potencia de diez del numerador (las potencias no tienen que ser las mismas).

EJEMPLO 1–7 Divida 5.0×10^8 entre 2.5×10^3 y exprese el resultado en notación científica.

Solución Escriba el problema de división con un numerador y un denominador, como

$$\frac{5.0 \times 10^8}{2.5 \times 10^3}$$

Divida los números y reste las potencias de diez (3 de 8).

$$\frac{5.0 \times 10^8}{2.5 \times 10^3} = 2 \times 10^{8-3} = \mathbf{2 \times 10^5}$$

Problema relacionado Divida 8×10^{-6} entre 2×10^{-10}.

REPASO DE LA SECCIÓN 1–2

1. La notación científica utiliza potencias de diez. (Verdadero o falso)
2. Exprese 100 como una potencia de diez.
3. Exprese los siguientes números en notación científica:
   (a) 4350 (b) 12,010 (c) 29,000,000
4. Exprese los siguientes números en notación científica:
   (a) 0.760 (b) 0.00025 (c) 0.000000597
5. Realice las siguientes operaciones:
   (a) $(1 \times 10^5) + (2 \times 10^5)$ (b) $(3 \times 10^6)(2 \times 10^4)$
   (c) $(8 \times 10^3) \div (4 \times 10^2)$ (d) $(2.5 \times 10^{-6}) - (1.3 \times 10^{-7})$

1–3 NOTACIÓN DE INGENIERÍA Y PREFIJOS MÉTRICOS

La notación de ingeniería, una forma especializada de notación científica, se utiliza mucho en los campos técnicos para representar cantidades grandes y pequeñas. En electrónica, la notación de ingeniería se emplea para representar valores de voltaje, corriente, potencia, resistencia, capacitancia, inductancia y tiempo, por nombrar algunos. Los prefijos métricos se utilizan junto con la notación de ingeniería como "abreviatura" para ciertas potencias de diez que son múltiplos de tres.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar notación de ingeniería y prefijos métricos para representar grandes y pequeñas cantidades**
  - Enumerar los prefijos métricos
  - Cambiar una potencia de diez dada en notación de ingeniería a un prefijo métrico
  - Utilizar prefijos métricos para expresar cantidades eléctricas
  - Convertir un prefijo métrico en otro

Notación de ingeniería

La notación de ingeniería es similar a la notación científica. Sin embargo, en **notación de ingeniería** un número puede tener de uno a tres dígitos a la izquierda del punto decimal y el exponente de potencia de diez debe ser un múltiplo de tres. Por ejemplo, el número 33,000 expresado

en notación de ingeniería es 33×10^3. En notación científica, se expresa como 3.3×10^4. Como otro ejemplo, el número 0.045 expresado en notación de ingeniería es 45×10^{-3}. En notación científica, se expresa como 4.5×10^{-2}.

EJEMPLO 1–8 Exprese los siguientes números en notación de ingeniería:

(a) 82,000 **(b)** 243,000 **(c)** 1,956,000

Solución En notación de ingeniería,

(a) 82,000 se expresa como $\mathbf{82 \times 10^3}$.

(b) 243,000 se expresa como $\mathbf{243 \times 10^3}$.

(c) 1,956,000 se expresa como $\mathbf{1.956 \times 10^6}$.

Problema relacionado Exprese 36,000,000,000 en notación de ingeniería.

EJEMPLO 1–9 Convierta cada uno de los siguientes números en notación de ingeniería:

(a) 0.0022 **(b)** 0.000000047 **(c)** 0.00033

Solución En notación de ingeniería,

(a) 0.0022 se expresa como $\mathbf{2.2 \times 10^{-3}}$.

(b) 0.000000047 se expresa como $\mathbf{47 \times 10^{-9}}$.

(c) 0.00033 se expresa como $\mathbf{330 \times 10^{-6}}$.

Problema relacionado Exprese 0.0000000000056 en notación de ingeniería.

Prefijos métricos

En notación de ingeniería, los **prefijos métricos** representan cada una de las potencias de diez más comúnmente utilizadas. Estos prefijos métricos se enumeran en la tabla 1-6 junto con sus símbolos y potencias de diez correspondientes.

Se utilizan prefijos métricos sólo con números que tienen una unidad de medida, tal como volts, amperes y ohms, y preceden al símbolo de la unidad. Por ejemplo, 0.025 amperes puede ser expresada en notación de ingeniería como 25×10^{-3}. Esta cantidad, expresada utilizando un prefijo métrico, es 25 mA, la cual se lee 25 miliamperes. Observe que el prefijo métrico *mili* ha

▶ **TABLA 1–6**

Prefijos métricos con sus símbolos, sus potencias de diez y sus valores.

PREFIJOS MÉTRICOS	SÍMBOLO	POTENCIA DE DIEZ	VALOR
femto	f	10^{-15}	un mil billonésimo
pico	p	10^{-12}	un billonésimo
nano	n	10^{-9}	un mil millonésimo
micro	μ	10^{-6}	un millonésimo
mili	m	10^{-3}	un milésimo
kilo	k	10^{3}	un mil
mega	M	10^{6}	un millón
giga	G	10^{9}	un mil millones
tera	T	10^{12}	un billón

reemplazado a 10^{-3}. Como otro ejemplo, 100,000,000 ohms puede ser expresada como $100 \times 10^6\ \Omega$. Esta cantidad, expresada utilizando un prefijo métrico, es 100 MΩ, la cual se lee 100 megohms. El prefijo métrico *mega* ha reemplazado a 10^6.

EJEMPLO 1–10 Exprese cada cantidad utilizando un prefijo métrico:

(a) 50,000 V **(b)** 25,000,000 Ω **(c)** 0.000036 A

Solución

(a) $50{,}000\ \text{V} = 50 \times 10^3\ \text{V} = \mathbf{50\ kV}$

(b) $25{,}000{,}000\ \Omega = 25 \times 10^6\ \Omega = \mathbf{25\ M\Omega}$

(c) $0.000036\ \text{A} = 36 \times 10^{-6}\ \text{A} = \mathbf{36\ \mu A}$

Problema relacionado Exprese utilizando prefijos métricos:

(a) 56,000,000 Ω **(b)** 0.000470 A

Información para usuarios de calculadoras

Todas las calculadoras científicas y de gráficos incluyen funciones para ingresar y desplegar números en varios formatos. Las notaciones de ingeniería y científica son casos especiales de notación exponencial (potencias de diez). La mayoría de las calculadoras dispone de una tecla identificada como EE (o EXP) que se utiliza para ingresar el exponente de números. Para ingresar un número en notación exponencial, primero se ingresa el número base, incluido el signo, y luego se oprime la tecla EE, y enseguida el exponente, incluido el signo.

Las calculadoras científicas y de gráficos tienen pantallas de visualización para mostrar la potencia de diez. Algunas calculadoras muestran el exponente como un pequeño número elevado a la derecha de lo que muestra la pantalla.

47.0 ^{03}

Otras calculadoras lo muestran con una E pequeña seguida por el exponente.

47.0E03

Advierta que, en general, no se muestra la base 10, sino que es implicada o representada por la E. Cuando se escribe el número, se tiene que incluir la base 10. El número mostrado anteriormente se escribe como 47.0×10^3.

Algunas calculadoras se activan en el modo de notación científica o de ingeniería por medio de una función secundaria o terciaria, tal como SCI o ENG. Entonces los números se ingresan en forma decimal regular. La calculadora los convierte automáticamente al formato apropiado. En otras calculadoras el modo se selecciona con un menú.

Siempre revise el manual del usuario de su calculadora particular para determinar cómo utilizar las funciones de notación exponencial.

REPASO DE LA SECCIÓN 1–3

1. Exprese los siguientes números en notación de ingeniería:
   (a) 0.0056 **(b)** 0.0000000283 **(c)** 950,000 **(d)** 375,000,000,000
2. Anote el prefijo métrico apropiado para cada una de las siguientes potencias de diez:
   10^6, 10^3, 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9} y 10^{-12}
3. Use un prefijo métrico apropiado para expresar 0.000001 A.
4. Use un prefijo métrico apropiado para expresar 250,000 W.

1–4 CONVERSIONES DE UNIDADES MÉTRICAS

En ocasiones es necesario o conveniente convertir la cantidad de una unidad que tiene un prefijo métrico a otra, tal como de miliamperes (mA) a microamperes (μA). Recorriendo el punto decimal del número una cantidad apropiada de lugares hacia la izquierda o la derecha, según la conversión de que se trate, se obtiene la conversión de unidad métrica.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Convertir una unidad con un prefijo métrico en otra**
  - Convertir entre mili, micro, nano y pico
  - Convertir entre kilo y mega

Las siguientes reglas básicas son aplicables a conversiones de unidades métricas:

1. Cuando se convierte una unidad grande en otra más pequeña, el punto decimal se mueve hacia la derecha.
2. Cuando se convierte una unidad pequeña en otra más grande, el punto decimal se mueve hacia la izquierda.
3. Se determina el número de lugares que debe recorrerse el punto decimal encontrando la diferencia en las potencias de diez de las unidades a convertir.

Por ejemplo, cuando se convierten miliamperes (mA) en microamperes (μA), el punto decimal se recorre tres lugares hacia la derecha porque existe una diferencia de tres lugares entre las dos unidades (mA es 10^{-3} A y μA es 10^{-6} A). Los ejemplos siguientes ilustran algunas conversiones.

EJEMPLO 1–11 Convierta 0.15 miliamperes (0.15 mA) a microamperes (μA).

Solución Recorra el punto decimal tres lugares hacia la derecha.

$$0.15\text{ mA} = 0.15 \times 10^{-3}\text{ A} = 150 \times 10^{-6}\text{ A} = \mathbf{150\ \mu A}$$

Problema relacionado Convierta 1 mA en microamperes.

EJEMPLO 1–12 Convierta 4500 microvolts (4500 μV) a milivolts (mV).

Solución Recorra el punto decimal tres lugares hacia la izquierda.

$$4500\ \mu\text{V} = 4500 \times 10^{-6}\text{ V} = 4.5 \times 10^{-3}\text{ V} = \mathbf{4.5\ mV}$$

Problema relacionado Convierta 1000 μV a milivolts.

EJEMPLO 1–13 Convierta 5000 nanoamperes (5000 nA) a microamperes (μA).

Solución Recorra el punto decimal tres lugares hacia la izquierda.

$$5000\text{ nA} = 5000 \times 10^{-9}\text{ A} = 5 \times 10^{-6}\text{ A} = \mathbf{5\ \mu A}$$

Problema relacionado Convierta 893 nA a microamperes.

EJEMPLO 1–14 Convierta 47,000 picofarads (47,000 pF) en microfarads (μF).

Solución Recorra el punto decimal seis lugares hacia la izquierda.

$$47{,}000\ \text{pF} = 47{,}000 \times 10^{-12}\ \text{F} = 0.047 \times 10^{-6}\ \text{F} = \mathbf{0.047\ \mu F}$$

Problema relacionado Convierta 10,000 pF a microfarads.

EJEMPLO 1–15 Convierta 0.00022 microfarads (0.00022 μF) a picofarads (pF).

Solución Recorra el punto decimal seis lugares hacia la derecha.

$$0.00022\ \mu\text{F} = 0.00022 \times 10^{-6}\ \text{F} = 220 \times 10^{-12}\ \text{F} = \mathbf{220\ pF}$$

Problema relacionado Convierta 0.0022 μF a picofarads.

EJEMPLO 1–16 Convierta 1800 kilohms (1800 kΩ) a megohms (MΩ).

Solución Recorra el punto decimal tres lugares hacia la izquierda.

$$1800\ \text{k}\Omega = 1800 \times 10^{3}\ \Omega = 1.8 \times 10^{6}\ \Omega = \mathbf{1.8\ M\Omega}$$

Problema relacionado Convierta 2.2 kΩ a megohms.

Cuando se suman (o restan) cantidades con diferentes prefijos métricos, primero se convierte una de la cantidades al mismo prefijo que la otra.

EJEMPLO 1–17 Sume 15 mA y 8000 μA y exprese la suma en miliamperes.

Solución Cambie 8000 μA a 8 mA y sume.

$$\begin{aligned}15\ \text{mA} + 8000\ \mu\text{A} &= 15 \times 10^{-3}\ \text{A} + 8000 \times 10^{-6}\ \text{A}\\ &= 15 \times 10^{-3}\ \text{A} + 8 \times 10^{-3}\ \text{A} = 15\ \text{mA} + 8\ \text{mA} = \mathbf{23\ mA}\end{aligned}$$

Problema relacionado Sume 2873 mA a 10,000 μA; exprese la suma en miliamperes

REPASO DE LA SECCIÓN 1–4

1. Convierta 0.01 MV a kilovolts (kV).
2. Convierta 250,000 pA a miliamperes (mA).
3. Sume 0.05 MW y 75 kW y exprese el resultado en kW.
4. Sume 50 mV y 25,000 μV y exprese el resultado en mV.

RESUMEN

- SI es una abreviatura de Système International d'Unités y representa un sistema estandarizado de unidades.
- Una unidad fundamental es una unidad SI de la cual se derivan otras unidades SI. Existen siete unidades fundamentales.
- La notación científica es un método estándar empleado para representar números muy grandes y muy pequeños tal como si fuesen un número entre uno y diez (un dígito a la izquierda del punto decimal) multiplicado por una potencia de diez.
- La notación de ingeniería es un método estándar empleado para representar cantidades con dos o tres dígitos a la izquierda del punto decimal multiplicados por una potencia de diez que es un múltiplo de tres.
- Los prefijos métricos representan potencias de diez en números expresados en notación de ingeniería.

TÉRMINOS CLAVE

En el glosario incluido al final del libro también se definen estos términos clave.

Exponente Es el número al cual se eleva un número base.

Notación científica Sistema empleado para representar cualquier número como un número entre 1 y 10 multiplicado por una potencia de diez apropiada.

Notación de ingeniería Sistema empleado para representar cualquier número como un número de uno, dos o tres dígitos multiplicado por una potencia de diez con un exponente que es múltiplo de 3.

Potencia de diez Representación numérica compuesta de una base de 10 y un exponente; el número 10 elevado a una potencia.

Prefijo métrico Afijo que representa un número que es potencia de diez expresado en notación de ingeniería.

SI Sistema internacional estandarizado de unidades de medición que se utiliza en todo trabajo de ingeniería y científico; abreviatura francesa para *Le Système International d'Unités*.

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. ¿Cuál de los siguientes términos no representa una cantidad eléctrica?
(a) corriente **(b)** voltaje **(c)** tiempo **(d)** potencia

2. La unidad de corriente es
(a) volt **(b)** watt **(c)** ampere **(d)** joule

3. La unidad de voltaje es
(a) ohm **(b)** watt **(c)** volt **(d)** farad

4. La unidad de resistencia es
(a) ampere **(b)** henry **(c)** hertz **(d)** ohm

5. Hertz es la unidad de
(a) potencia **(b)** inductancia **(c)** frecuencia **(d)** tiempo

6. 15,000 W es lo mismo que
(a) 15 mW **(b)** 15 kW **(c)** 15 MW **(d)** 15 μW

7. La cantidad 4.7×10^3 es lo mismo que
(a) 470 **(b)** 4700 **(c)** 47,000 **(d)** 0.0047

8. La cantidad 56×10^{-3} es lo mismo que
(a) 0.056 **(b)** 0.560 **(c)** 560 **(d)** 56,000

9. El número 3,300,000 puede ser expresado en notación de ingeniería como
(a) 3300×10^3 **(b)** 3.3×10^{-6} **(c)** 3.3×10^6 **(d)** cualquier respuesta (a) o (c)

10. Diez miliamperes pueden ser expresados como
(a) 10 MA **(b)** 10 μA **(c)** 10 kA **(d)** 10 mA

11. Cinco mil volts pueden ser expresados como
(a) 5000 V **(b)** 5 MV **(c)** 5 kV **(d)** cualquier respuesta (a) o (c)

12. Veinte millones de ohms pueden ser expresados como
(a) 20 mΩ **(b)** 20 MW **(c)** 20 MΩ **(d)** 20 $\mu\Omega$

PROBLEMAS

Las respuestas a problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 1–2 Notación científica

1. Exprese cada uno de los números siguientes en notación científica:
(a) 3000 **(b)** 75,000 **(c)** 2,000,000

2. Exprese cada número fraccionario en notación científica:
(a) 1/500 **(b)** 1/2000 **(c)** 1/5,000,000

3. Exprese cada uno de los números siguientes en notación científica:
(a) 8400 **(b)** 99,000 **(c)** 0.2×10^6

4. Exprese cada uno de los números siguientes en notación científica:
(a) 0.0002 **(b)** 0.6 **(c)** 7.8×10^{-2}

5. Exprese cada uno de los números siguientes en notación científica:
(a) 32×10^3 **(b)** 6800×10^{-6} **(c)** 870×10^8

6. Exprese cada uno de los números siguientes como un número decimal regular:
(a) 2×10^5 **(b)** 5.4×10^{-9} **(c)** 1.0×10^1

7. Exprese cada uno de los números siguientes como un número decimal regular:
(a) 2.5×10^{-6} **(b)** 5.0×10^2 **(c)** 3.9×10^{-1}

8. Exprese cada número de los siguientes como un número decimal regular:
(a) 4.5×10^{-6} **(b)** 8×10^{-9} **(c)** 4.0×10^{-12}

9. Sume los números siguientes:
(a) $(9.2 \times 10^6) + (3.4 \times 10^7)$ **(b)** $(5 \times 10^3) + (8.5 \times 10^{-1})$
(c) $(5.6 \times 10^{-8}) + (4.6 \times 10^{-9})$

10. Efectúe las siguientes sustracciones:
(a) $(3.2 \times 10^{12}) - (1.1 \times 10^{12})$ **(b)** $(2.6 \times 10^8) - (1.3 \times 10^7)$
(c) $(1.5 \times 10^{-12}) - (8 \times 10^{-13})$

11. Realice las siguientes multiplicaciones:
(a) $(5 \times 10^3)(4 \times 10^5)$ **(b)** $(1.2 \times 10^{12})(3 \times 10^2)$
(c) $(2.2 \times 10^{-9})(7 \times 10^{-6})$

12. Realice las siguientes divisiones:
(a) $(1.0 \times 10^3) \div (2.5 \times 10^2)$ **(b)** $(2.5 \times 10^{-6}) \div (5.0 \times 10^{-8})$
(c) $(4.2 \times 10^8) \div (2 \times 10^{-5})$

SECCIÓN 1–3 Notación de ingeniería y prefijos métricos

13. Exprese cada uno de los números siguientes en notación de ingeniería:
(a) 89,000 **(b)** 450,000 **(c)** 12,040,000,000,000

14. Exprese cada número en notación de ingeniería:
(a) 2.35×10^5 **(b)** 7.32×10^7 **(c)** 1.333×10^9

15. Exprese cada número en notación de ingeniería:
(a) 0.000345 **(b)** 0.025 **(c)** 0.00000000129

16. Exprese cada número en notación de ingeniería:
(a) 9.81×10^{-3} **(b)** 4.82×10^{-4} **(c)** 4.38×10^{-7}

17. Sume los números siguientes y exprese cada resultado en notación de ingeniería:
(a) $(2.5 \times 10^{-3}) + (4.6 \times 10^{-3})$ **(b)** $(68 \times 10^6) + (33 \times 10^6)$
(c) $(1.25 \times 10^6) + (250 \times 10^3)$

18. Multiplique los números siguientes y exprese cada resultado en notación de ingeniería:
(a) $(32 \times 10^{-3})(56 \times 10^3)$ **(b)** $(1.2 \times 10^{-6})(1.2 \times 10^{-6})$
(c) $100(55 \times 10^{-3})$

19. Divida los números siguientes y exprese cada resultado en notación de ingeniería:
   (a) $50 \div (2.2 \times 10^3)$ **(b)** $(5 \times 10^3) \div (25 \times 10^{-6})$
   (c) $560 \times 10^3 \div (660 \times 10^3)$

20. Exprese cada número del problema 13 en ohms por medio de un prefijo métrico.

21. Exprese cada número del problema 15 en amperes por medio de un prefijo métrico.

22. Expresse cada uno de los siguientes números como una cantidad precedida por un prefijo métrico:
   (a) 31×10^{-3} A   **(b)** 5.5×10^3 V   **(c)** 20×10^{-12} F

23. Exprese cada una de las cantidades siguientes por medio de prefijos métricos:
   (a) 3×10^{-6} F   **(b)** $3.3 \times 10^6\ \Omega$ **(c)** 350×10^{-9} A

24. Exprese cada una de las cantidades siguientes por medio de prefijos métricos:
   (a) 2.5×10^{-12} A   **(b)** 8×10^9 Hz   **(c)** $4.7 \times 10^3\ \Omega$

25. Exprese cada cantidad convirtiendo el prefijo métrico en una potencia de 10:
   (a) 7.5 pA   **(b)** 3.3 GHz   **(c)** 280 nW

26. Exprese cada cantidad en notación de ingeniería:
   (a) 5 μA   **(b)** 43 mV   **(c)** 275 kΩ **(d)** 10 MW

SECCIÓN 1–4 Conversiones de unidades métricas

27. Realice las conversiones indicadas:
   (a) 5 mA a microamperes   (b) 3200 μW a miliwatts
   (c) 5000 kV a megavolts   (d) 10 MW a kilowatts

28. Determine lo siguiente:
   (a) El número de microamperes en 1 miliampere
   (b) El número de milivolts en 0.05 kilovolts
   (c) El número de megohms en 0.02 kilohms
   (d) El número de kilowatts en 155 miliwatts

29. Sume las siguientes cantidades:
   (a) 50 mA + 680 μA   **(b)** 120 kΩ + 2.2 MΩ **(c)** 0.02 μF + 3300 pF

30. Realice las siguientes operaciones:
   (a) 10 kΩ ÷ (2.2 kΩ + 10 kΩ)   **(b)** 250 mV ÷ 50 μV   **(c)** 1 MW ÷ 2 kW

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 1–1 Unidades de medición

1. Las unidades fundamentales definen las derivadas.
2. Ampere.
3. SI es la abreviatura de Système International.
4. Remítase a la tabla 1-3 una vez que haya compilado su lista de cantidades eléctricas.
5. Remítase a la tabla 1-4 una vez que haya compilado su lista de cantidades magnéticas.

SECCIÓN 1–2 Notación científica

1. Verdadero
2. 10^2
3. **(a)** 4.35×10^3 **(b)** 1.201×10^4 **(c)** 2.9×10^7
4. **(a)** 7.6×10^{-1} **(b)** 2.5×10^{-4} **(c)** 5.97×10^{-7}
5. **(a)** 3×10^5 **(b)** 6×10^{10} **(c)** 2×10^1 **(d)** 2.37×10^{-6}

SECCIÓN 1–3 Notación de ingeniería y prefijos métricos

1. **(a)** 5.6×10^{-3} **(b)** 28.3×10^{-9} **(c)** 950×10^{3} **(d)** 375×10^{9}

2. Mega (M), kilo (k), mili (m), micro (μ), nano (n), y pico (p).

3. 1 μA (un microampere)

4. 250 kW (250 kilowatts)

SECCIÓN 1–4 Conversión de unidades métricas

1. 0.01 MV = 10 kV

2. 250,000 pA = 0.00025 mA

3. 0.05 MW + 75 kW = 50 kW + 75 kW = 125 kW

4. 50 mV + 25,000 μV = 50 mV + 25 mV = 75 mV

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

1–1 4.75×10^{3}

1–2 7.38×10^{-3}

1–3 9120

1–4 5.81×10^{4}

1–5 1.85×10^{-5}

1–6 4.8×10^{3}

1–7 4×10^{4}

1–8 36×10^{9}

1–9 5.6×10^{-12}

1–10 **(a)** 56 MΩ **(b)** 470 μA

1–11 1000 μA

1–12 1 mV

1–13 0.893 μA

1–14 0.01 μF

1–15 2200 pF

1–16 0.0022 MΩ

1–17 2883 mA

AUTOEVALUACIÓN

1. (c) **2.** (c) **3.** (c) **4.** (d) **5.** (c) **6.** (b)

7. (b) **8.** (a) **9.** (d) **10.** (d) **11.** (d) **12.** (c)

2 VOLTAJE, CORRIENTE Y RESISTENCIA

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Describir la estructura básica de los átomos
- Explicar el concepto de carga eléctrica
- Definir *voltaje, corriente* y *resistencia* y analizar sus características
- Analizar una fuente de voltaje y una fuente de corriente
- Reconocer y analizar diversos tipos y valores de resistencias
- Describir un circuito eléctrico básico
- Realizar mediciones de circuito básicas
- Reconocer los riesgos eléctricos y practicar procedimientos de seguridad

TÉRMINOS CLAVE

- Aislante
- Ampere
- Amperímetro
- Átomo
- AWG
- Carga
- Circuito
- Circuito abierto
- Circuito cerrado
- Conductancia
- Conductor
- Corriente
- Coulomb
- Choque eléctrico
- DMM
- Electrón
- Electrón libre
- Fuente de corriente
- Fuente de voltaje
- Ohm
- Ohmmetro
- Potenciómetro
- Reóstato
- Resistencia
- Resistor
- Semiconductor
- Siemens
- Tierra
- Volt
- Voltaje
- Voltímetro

DESCRIPCIÓN PREVIA DE LA APLICACIÓN DE UN CIRCUITO

En la sección titulada *Una aplicación de un circuito*, verá cómo se aplica la teoría presentada en este capítulo a un circuito práctico que simula ser una parte del sistema de iluminación de un automóvil. Las luces de un automóvil son ejemplos de tipos simples de circuitos eléctricos. Cuando usted enciende los faros delanteros y las luces traseras está conectándolos a la batería, la cual proporciona el voltaje y produce corriente en cada foco. La corriente hace que los focos emitan luz. Éstos tienen una resistencia que limita la cantidad de corriente. La luz del tablero de instrumentos puede ser ajustada en la mayoría de los automóviles en cuanto a brillantez. Al girar una perilla la resistencia del circuito cambia, por lo que la corriente cambia también. La corriente que pasa por el foco determina su brillantez.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Apoyos complementarios de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

La aplicación útil de la tecnología electrónica en situaciones prácticas requiere que primero se conozca la teoría fundamental de una aplicación dada. Una vez que usted haya dominado la teoría, puede aprender a aplicarla en la práctica. En este capítulo y en lo que resta del libro, aprenderá a poner en práctica la teoría en aplicaciones de circuitos.

En este capítulo se introducen los conceptos teóricos de corriente, voltaje y resistencia eléctricos. Usted aprenderá a expresar cada una de estas cantidades en las unidades apropiadas y cómo se mide cada cantidad. Se presentan los elementos esenciales que conforman un circuito eléctrico básico y la manera de ensamblarlos.

Se presentan los tipos de artefactos que generan voltaje y corriente. Además, usted verá una variedad de componentes que se utilizan para introducir resistencia en circuitos eléctricos. Se analiza la operación de dispositivos protectores, tales como fusibles y disyuntores de circuito, y se introducen los interruptores mecánicos utilizados comúnmente en circuitos eléctricos. También aprenderá cómo controlar y medir voltaje, corriente y resistencia empleando instrumentos de medición.

El voltaje es esencial en cualquier tipo de circuito eléctrico. El voltaje es la energía potencial de la carga eléctrica requerida para que el circuito trabaje. También es necesaria la corriente para que operen los circuitos eléctricos, pero se requiere voltaje para producirla. La corriente es el movimiento de electrones que tiene lugar a través del circuito. En un circuito eléctrico, la resistencia limita la cantidad de corriente. Un sistema de distribución de agua puede ser utilizado como analogía de un circuito simple. El voltaje puede ser considerado análogo a la presión requerida para que el agua fluya por las tuberías. La corriente que pasa por los alambres, o conductores, puede ser considerada análoga al agua que circula por las tuberías. La resistencia puede ser considerada análoga a la restricción del flujo de agua que se produce al ajustar una válvula.

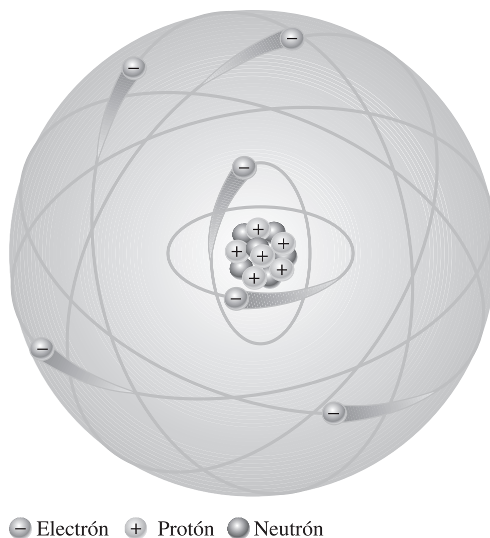
2–1 ESTRUCTURA ATÓMICA

Toda la materia se compone de átomos, y todos los átomos se componen de electrones, protones y neutrones. En esta sección aprenderá acerca de la estructura de un átomo, lo cual incluye capas y órbitas de los electrones, electrones de valencia, iones y niveles de energía. La configuración que presentan ciertos electrones en un átomo es el factor clave para determinar qué tan bien conduce la corriente eléctrica un material conductor o semiconductor.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir la estructura básica de los átomos**
  - Definir los términos *núcleo*, *protón*, *neutrón* y *electrón*
  - Definir el término *número atómico*
  - Definir el término *capa*
  - Explicar qué es un electrón de valencia
  - Describir la ionización
  - Explicar qué es un electrón libre
  - Definir los términos *conductor*, *semiconductor* y *aislante*

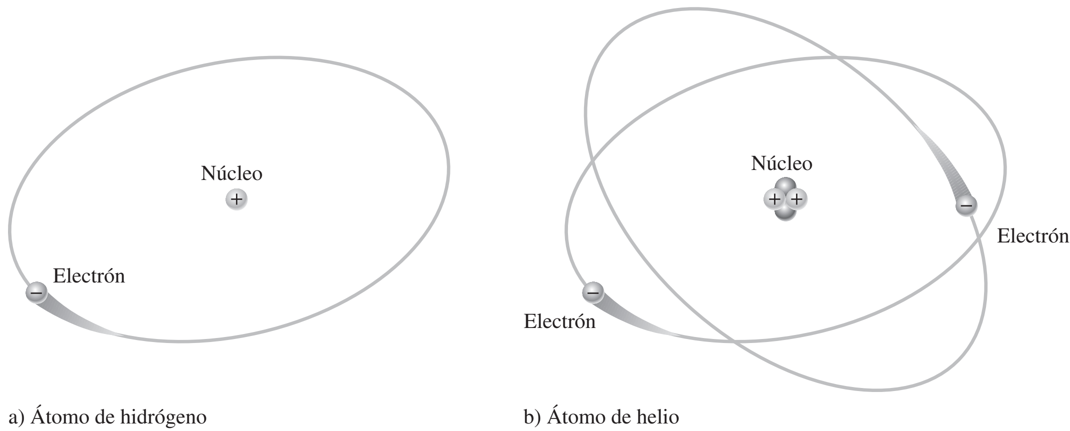
Un **átomo** es la partícula más pequeña de un **elemento** que conserva las características de dicho elemento. Cada uno de los 109 elementos conocidos tiene átomos que son diferentes de los átomos de todos los demás elementos. Esto da a cada elemento una estructura atómica única. Según el modelo básico de Bohr, en un átomo se visualiza como una estructura de tipo planetario que consta de un núcleo central rodeado por electrones que lo orbitan, tal como se ilustra en la figura 2-1. El **núcleo** se compone de partículas cargadas positivamente y llamadas **protones**, así como de partículas no cargadas que se denominan **neutrones**. Las partículas básicas de carga negativa se llaman **electrones**.



◀ **FIGURA 2–1**

Modelo de Bohr de un átomo que muestra los electrones en órbitas circulares alrededor del núcleo. En los electrones, las "colas" indican que están en movimiento.

Cada tipo de átomo tiene un cierto número de electrones y protones que lo distingue de los átomos de todos los demás elementos. Por ejemplo, el átomo más simple es el de hidrógeno, el cual tiene un protón y un electrón, como se ilustra en la figura 2-2(a). Otro ejemplo, el átomo de helio, mostrado en la figura 2-2(b), tiene dos protones y dos neutrones en el núcleo más dos electrones que orbitan el núcleo.



▲ FIGURA 2–2

Los dos átomos más simples, hidrógeno y helio.

Número atómico

Todos los elementos están dispuestos en la tabla periódica de los elementos en un orden que va de acuerdo con su **número atómico**. El número atómico es igual al número de protones presentes en el núcleo. Por ejemplo, el número atómico del hidrógeno es 1 y el del helio es 2. En su estado normal (o neutro), todos los átomos de un elemento dado tienen el mismo número de electrones y de protones; las cargas positivas igualan a las cargas negativas, y el átomo tiene una carga neta de cero que lo vuelve eléctricamente neutro.

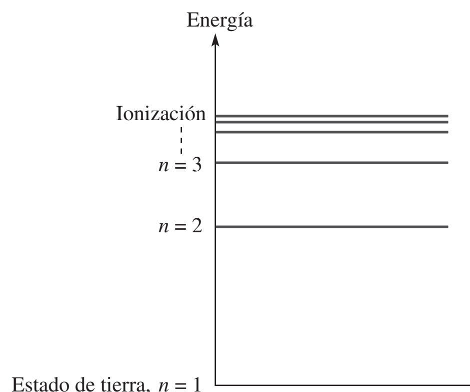
Capas, órbitas y niveles de energía

Tal como se ha visto en el modelo de Bohr, los electrones describen órbitas alrededor del núcleo a ciertas distancias de éste y están restringidos a dichas órbitas específicas. Dentro del átomo, cada órbita corresponde a un nivel de energía diferente conocido como **capa**. Las capas se designan con 1, 2, 3, y así sucesivamente, siendo la capa 1 la más cercana al núcleo. Los electrones más alejados del núcleo están a niveles de energía más altos.

De acuerdo con el modelo de Bohr para el átomo, las líneas espectrales del hidrógeno muestran que los electrones sólo pueden absorber o emitir una cantidad de energía específica que representa la diferencia exacta entre los niveles de energía. La figura 2-3 muestra dichos niveles

▶ FIGURA 2–3

Niveles de energía en hidrógeno.



dentro del átomo de hidrógeno. El nivel más bajo ($n = 1$) se llama *estado de tierra* y representa el átomo más estable con un solo electrón en la primera capa. Si este electrón adquiere una cantidad específica de energía absorbiendo un fotón, puede ascender hasta uno de los niveles de energía más altos. En este estado alto, el electrón puede emitir un fotón que contenga exactamente la misma cantidad de energía y regresar entonces al estado de tierra. Las transiciones entre los niveles de energía explican los diversos fenómenos que se presentan en la electrónica, tales como el color de la luz emitida por un diodo emisor de luz.

Después del trabajo de Bohr, Erin Schroedinger (1887-1961) propuso una teoría matemática para el átomo donde explica los átomos más complicados. Schroedinger sugirió que el electrón posee una propiedad de onda, y consideró que el caso más simple tiene un patrón de ondas estacionarias tridimensionales producidas por vibraciones. Schroedinger teorizó que la onda estacionaria de un electrón de forma esférica sólo podía tener ciertas longitudes de onda. Este modelo de mecánica de ondas del átomo produjo la misma ecuación para la energía del electrón en hidrógeno que el modelo de Bohr, pero en el modelo de mecánica de ondas, los átomos más complicados podían explicarse considerando formas diferentes a esferas y añadiendo una designación para la orientación de una forma dada dentro del átomo. En ambos modelos, los electrones próximos al núcleo tienen menos energía que los más alejados, lo cual se constituyó en el concepto básico de los niveles de energía.

La idea de niveles de energía discretos dentro del átomo sigue siendo el fundamento para entenderlo, y el modelo de mecánica de ondas ha tenido mucho éxito en la predicción de los niveles de energía de varios átomos. El modelo de mecánica de ondas del átomo utilizó el número de capa, llamado *número cuántico principal*, en la ecuación de energía. Otros tres números cuánticos describen a cada electrón presente en el átomo. Todos los electrones presentes en un átomo tienen un conjunto único de números cuánticos.

Cuando un átomo forma parte de un gran grupo, como en un cristal, los niveles de energía discretos se ensanchan hasta formar bandas de energía, lo cual constituye una importante idea en la electrónica de estado sólido. Las bandas también están diferenciadas entre conductores, semiconductores y aislantes.

Electrones de valencia

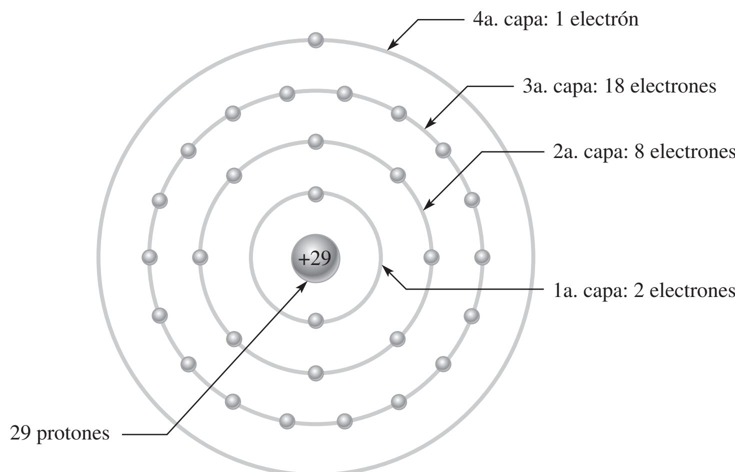
Los electrones que se localizan en órbitas alejadas del núcleo están dotados de más energía y se encuentran menos estrechamente ligados al átomo que aquellos cercanos al núcleo. Esto se debe a que la fuerza de atracción entre el núcleo positivamente cargado y el electrón negativamente cargado disminuye al incrementarse la distancia al núcleo. Electrones con los niveles de energía más altos existen en la capa más externa de un átomo y su ligazón a éste es relativamente holgada. Esta capa más alejada se conoce como capa de **valencia** y los electrones presentes en ella se llaman **electrones de valencia**. Los electrones de valencia contribuyen a las reacciones químicas y al enlace desarrollados dentro de la estructura de un material, y determinan las propiedades eléctricas de éste.

Niveles de energía y energía de ionización

Si un electrón absorbe un fotón que posea energía suficiente, escapa del átomo y se convierte en un **electrón libre**. Esto se indica mediante el nivel de energía de ionización mostrado en la figura 2-3. En todo momento que un átomo o grupo de átomos permanece con una carga neta se le conoce como **ion**. Cuando un electrón escapa del átomo de hidrógeno neutro (designado H), el átomo queda con una carga neta positiva y se convierte en un *ion positivo* (designado H^+). En algunos casos, un átomo o grupo de átomos puede adquirir un electrón, en cuyo caso se llama *ion negativo*.

El átomo de cobre

El cobre es el metal más comúnmente utilizado en aplicaciones **eléctricas**. El átomo de cobre tiene 29 electrones que orbitan el núcleo en cuatro capas. El número de electrones presentes en cada capa sigue un patrón predecible de acuerdo con la fórmula $2N^2$, donde N es el número de la capa. La primera capa de cualquier átomo puede tener hasta 2 electrones, la segunda capa hacia arriba hasta 8 electrones, la tercera capa hacia arriba hasta 18 electrones, y la cuarta capa hacia arriba hasta 32 electrones.



▶ **FIGURA 2–4**

El átomo de cobre.

La figura 2-4 ilustra un átomo de cobre. Advierta que la cuarta o más alejada capa, la capa de valencia, tiene sólo un electrón de valencia. Cuando el electrón de valencia presente en la capa más externa del átomo de cobre adquiere suficiente energía térmica, puede liberarse del átomo padre y convertirse en electrón libre. En un pedazo de cobre a temperatura ambiente, un "mar" de estos electrones libres está presente. Tales electrones no están ligados a un átomo dado sino que son libres de moverse en el material de cobre. Los electrones libres hacen del cobre un excelente conductor y posibilitan la corriente eléctrica.

Categorías de materiales

En electrónica se utilizan tres categorías de materiales: conductores, semiconductores y aislantes.

Conductores Los materiales **conductores** son aquellos que permiten el paso de la corriente. Tienen un gran número de electrones libres y se caracterizan por poseer de uno a tres electrones de valencia en su estructura. La mayoría de los metales son buenos conductores. La plata es el mejor material conductor, y el cobre es el siguiente. El cobre es el material conductor más ampliamente utilizado porque es menos caro que la plata. En circuitos eléctricos, comúnmente se emplea alambre de cobre como conductor.

Semiconductores Los materiales **semiconductores** se clasifican por debajo de los conductores, en cuanto a su capacidad de transportar corriente, porque tienen menos electrones libres que los conductores. Los semiconductores tienen cuatro electrones de valencia en sus estructuras atómicas. Sin embargo, a causa de sus características únicas, ciertos materiales semiconductores constituyen la base de artefactos **electrónicos** tales como el diodo, el transistor y el circuito integrado. El silicio y el germanio son materiales semiconductores comunes.

Aislantes Los materiales **aislantes** son conductores deficientes de la corriente eléctrica. De hecho, los aislantes se utilizan para evitar la corriente donde no es deseada. Comparados con los materiales conductores, los aislantes tienen muy pocos electrones libres y se caracterizan por poseeer más de cuatro electrones de valencia en sus estructuras atómicas.

REPASO DE LA SECCIÓN 2–1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. ¿Cuál es la partícula básica de carga negativa?
2. Defina el término *átomo*.
3. ¿De qué se compone un átomo?
4. Defina el término *número atómico*.
5. ¿Todos los elementos tienen los mismos tipos de átomos?
6. ¿Qué es un electrón libre?
7. ¿En la estructura atómica, qué es una capa?
8. Nombre dos materiales conductores.

2–2 CARGA ELÉCTRICA

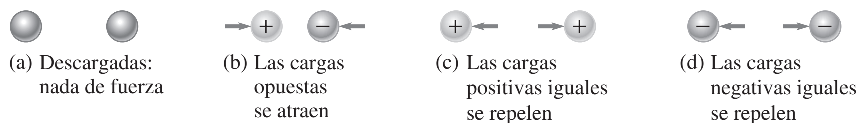
Como se sabe, un electrón es la partícula más pequeña que exhibe carga eléctrica negativa. Cuando en un material está presente un exceso de electrones, existe una carga eléctrica negativa neta. Cuando hay deficiencia de electrones, existe una carga eléctrica positiva neta.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar el concepto de carga eléctrica**
  - Nombrar la unidad de carga
  - Nombrar los tipos de carga
  - Analizar las fuerzas de atracción y repulsión
  - Determinar la cantidad de carga presente en un número dado de electrones

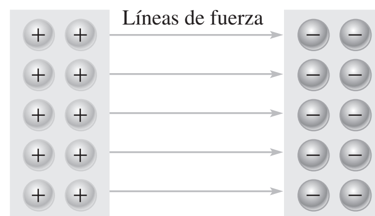
La carga de un electrón y la de un protón son iguales en magnitud. La **carga** eléctrica, una propiedad eléctrica de la materia que existe en virtud de exceso o deficiencia de electrones, es simbolizada mediante Q. La electricidad estática es la presencia de una carga positiva o negativa neta en un material. Todo mundo ha experimentado los efectos de la electricidad estática de vez en cuando, por ejemplo, cuando se intenta tocar una superficie metálica o a otra persona, o cuando las prendas de vestir puestas en una secadora se adhieren entre sí.

Los materiales con cargas de polaridad opuesta se atraen entre sí, y los materiales con cargas de la misma polaridad se repelen, como se muestra en la figura 2-5. Entre las cargas actúa una fuerza, evidenciada por la atracción o la repulsión. Esta fuerza, llamada *campo eléctrico*, se compone de líneas de fuerza invisibles, como indica la figura 2-6.



▲ FIGURA 2–5

Atracción y repulsión de cargas eléctricas.



◀ FIGURA 2–6

Campo eléctrico entre dos superficies opuestamente cargadas.

BIOGRAFÍA



Charles Augustin Coulomb 1736–1806

Coulomb, francés, ejerció muchos años como ingeniero militar. Cuando su mala salud lo obligó a retirarse, dedicó su tiempo a la investigación científica. Se le conoce mejor por su trabajo en el campo de la electricidad y el magnetismo debido su desarrollo de la ley del inverso de los cuadrados en relación a la fuerza entre dos cargas. La unidad de carga eléctrica fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Cortesía de Smithsonian Institution. Fotografía número 52,597).

Coulomb: La unidad de carga

La carga eléctrica (Q) se mide en coulombs, simbolizada mediante C.

Un coulomb es la carga total poseída por 6.25×10^{18} electrones.

Un solo electrón tiene una carga de 1.6×10^{-19} C. La carga total Q, expresada en coulombs, de un número dado de electrones se establece en la fórmula siguiente:

$$Q = \frac{\text{número de electrones}}{6.25 \times 10^{18}\ \text{electrones/C}}$$

Ecuación 2–1

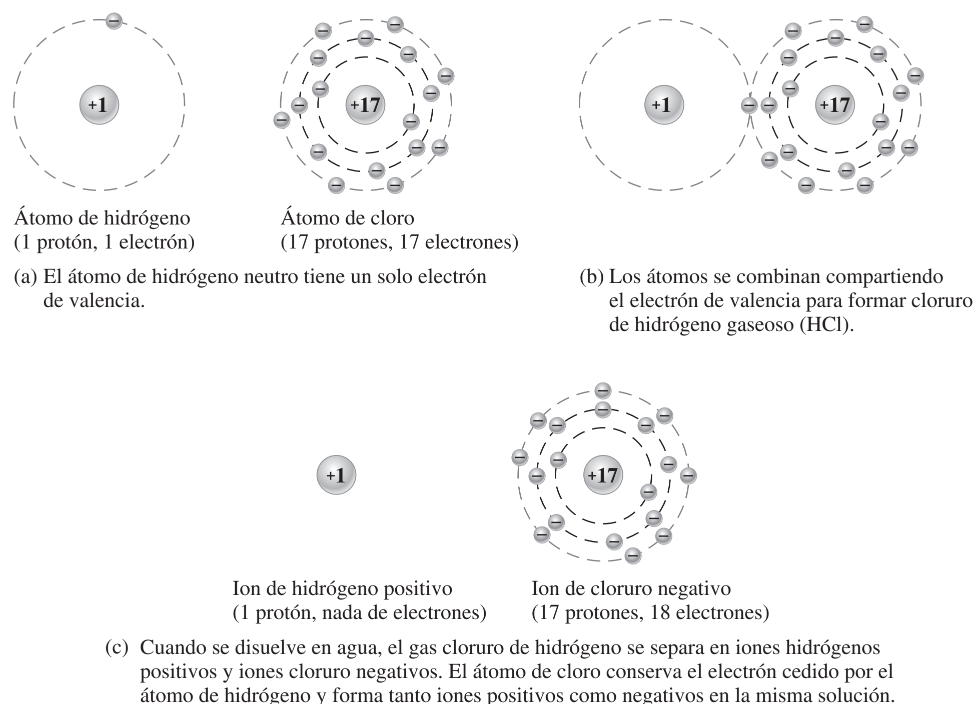
Carga positiva y carga negativa

Considere un átomo neutro, es decir, uno que tiene el mismo número de electrones y protones y, por tanto, no tiene carga neta. Como se sabe, cuando un electrón de valencia es arrancado del átomo por la aplicación de energía, el átomo se queda con una carga positiva neta (más protones que electrones) y se transforma en un ion positivo. Si un átomo adquiere un electrón extra en su capa externa, tiene una carga negativa neta y se transforma en un ion negativo.

La cantidad de energía requerida para liberar un electrón de valencia está relacionada con el número de electrones presentes en la capa externa. Un átomo puede tener hasta ocho electrones de valencia. Mientras más completa está la capa externa, más estable es el átomo y, por tanto, se requiere más energía para liberar un electrón. La figura 2-7 ilustra la creación de un ion positivo y de un ion negativo cuando un átomo de hidrógeno cede su único electrón de valencia a un átomo de cloro, y se forma cloruro de hidrógeno gaseoso (HCl). Cuando el HCl gaseoso se disuelve en agua, se forma ácido hidroclórico.

▶ **FIGURA 2–7**

Ejemplo de la formación de iones positivos y negativos.



EJEMPLO 2–1 ¿Cuántos coulombs representan 93.8×10^{16} electrones?

Solución

$$Q = \frac{\text{número de electrones}}{6.25 \times 10^{18}\ \text{electrones/C}} = \frac{93.8 \times 10^{16}\ \text{electrones}}{6.25 \times 10^{18}\ \text{electrones/C}} = 15 \times 10^{-2}\ \text{C} = \mathbf{0.15\ C}$$

*Problema relacionado** ¿Cuántos electrones se requieren para tener 3 C de carga?

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

REPASO DE LA SECCIÓN 2–2

1. ¿Cuál es el símbolo de carga?
2. ¿Cuál es la unidad de carga, y cuál es el símbolo de la unidad?
3. ¿Qué provoca que una carga sea positiva o negativa?
4. ¿Cuánta carga, en coulombs, hay en 10×10^{12} electrones?

2–3 VOLTAJE, CORRIENTE Y RESISTENCIA

El voltaje, la corriente y la resistencia son las cantidades básicas presentes en todos los circuitos eléctricos. El voltaje es necesario para producir corriente, y la resistencia limita la cantidad de corriente en un circuito. La relación de estas tres cantidades se describe mediante la ley de Ohm en el capítulo 3.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Definir los términos *voltaje*, *corriente* y *resistencia* y analizar las características de cada uno**
  - Enunciar la fórmula del voltaje y nombrar su unidad
  - Enunciar la fórmula de la corriente y nombrar su unidad
  - Explicar el movimiento de electrones
  - Nombrar la unidad de resistencia

Voltaje

Como se ha visto, existe una fuerza de atracción entre una carga positiva y una negativa. Se debe aplicar cierta cantidad de energía, en forma de trabajo, para vencer dicha fuerza y separar las cargas a determinada distancia. Todas las cargas opuestas poseen cierta energía potencial a causa de la separación que hay entre ellas. La diferencia en la energía potencial por carga es la diferencia de potencial o **voltaje**. En circuitos eléctricos, el voltaje es la fuerza propulsora y es lo que establece la corriente.

Como una analogía, considere un tanque de agua que está soportado a varios pies sobre el nivel del suelo. Se debe ejercer una cantidad dada de energía, en forma de trabajo, para subir agua y llenar el tanque. Una vez almacenada en el tanque, el agua tiene cierta energía potencial que, si es liberada, puede utilizarse para realizar trabajo.

El voltaje, simbolizado mediante V, se define como energía o trabajo por unidad de carga.

$$V = \frac{W}{Q}$$ **Ecuación 2–2**

donde: V = voltaje en volts (V)
W = energía en joules (J)
Q = carga en coulombs (C)

La unidad de voltaje es el volt, simbolizada mediante V.

Un volt **es la diferencia de potencial (voltaje) entre dos puntos cuando se utiliza un joule de energía para mover un coulomb de carga de un punto a otro.**

BIOGRAFÍA



Alessandro Volta
1745–1827

Volta, italiano, inventó un dispositivo para generar electricidad estática y descubrió el gas metano. Volta investigó las reacciones entre metales disímilares y desarrolló la primera batería en 1800. El potencial eléctrico, más comúnmente conocido como voltaje, y la unidad de voltaje, el volt, fueron nombrados en su honor. (Crédito de la fotografía, AIP Emilio Segrè Visual Archives, Colección Lande).

EJEMPLO 2–2 Si por cada 10 C de carga están disponibles 50 J de energía, ¿cuál es el voltaje?

Solución

$$V = \frac{W}{Q} = \frac{50\ \text{J}}{10\ \text{C}} = \mathbf{5\ V}$$

Problema relacionado ¿Cuánta energía se utiliza para mover 50 C de un punto a otro cuando el voltaje entre los dos puntos es de 12 V?

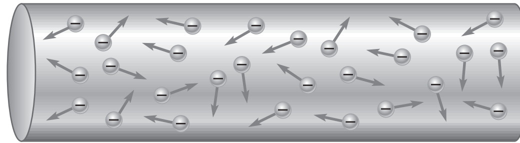
Corriente

El voltaje proporciona energía a los electrones, lo que les permite moverse por un circuito. Este movimiento de electrones es la corriente, la cual produce trabajo en un circuito eléctrico.

Como se ha aprendido, en todos los materiales conductores y semiconductores están disponibles electrones libres. Estos electrones se mueven al azar en todas direcciones, de un átomo a otro, dentro de la estructura del material, tal como indica la figura 2-8.

▶ **FIGURA 2–8**

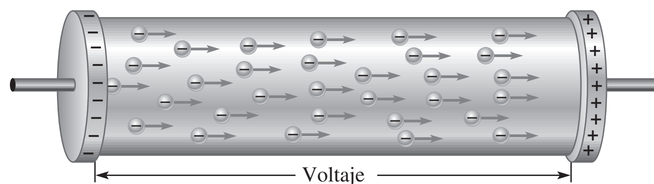
Movimiento aleatorio de electrones libres en un material.



Si en un material conductor o semiconductor se establece voltaje, un extremo del material se vuelve positivo y el otro negativo, como indica la figura 2-9. La fuerza repulsiva producida por el voltaje negativo en el extremo izquierdo hace que los electrones libres (cargas negativas) se muevan hacia la derecha. La fuerza de atracción producida por el voltaje positivo en el extremo derecho tira de los electrones libres hacia la derecha. El resultado es un movimiento neto de los electrones libres desde el extremo negativo del material hasta el extremo positivo, como indica la figura 2-9.

▶ **FIGURA 2–9**

Los electrones fluyen de negativo a positivo cuando se aplica un voltaje a través de un material conductor o semiconductor.



El movimiento de estos electrones libres del extremo negativo del material al extremo positivo es la corriente eléctrica, simbolizada mediante *I*.

La corriente **eléctrica es la velocidad que lleva el flujo de la carga.**

En un material conductor, el número de electrones (cantidad de carga) que fluyen más allá de cierto punto en una unidad de tiempo determinan la corriente.

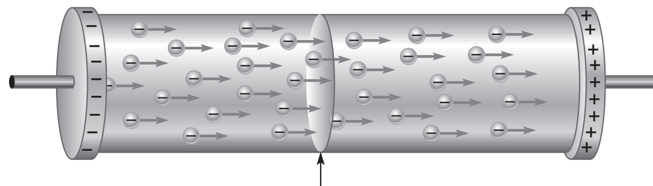
Ecuación 2–3

$$I = \frac{Q}{t}$$

donde: I = corriente en amperes (A)
Q = carga en coulombs (C)
t = tiempo en segundos (s)

Un ampere **(1 A) es la cantidad de corriente que existe cuando cierto número de electrones, cuya carga total es de un coulomb (1 C), pasa por un área de sección transversal dada en un segundo (1 s).**

Vea la figura 2-10. Recuerde que un coulomb es la carga transportada por 6.25×10^{18} electrones.



Cuando cierto número de electrones que tienen una carga total de 1 C pasan por un área de sección transversal en 1 s, la corriente es de 1 A.

▲ **FIGURA 2–10**

Ilustración de 1 A de corriente (1 C/s) en un material.

BIOGRAFÍA



André Marie Ampère 1775–1836

En 1820 Ampère, francés, desarrolló una teoría de electricidad y magnetismo que resultó fundamental para los desarrollos efectuados en el siglo XIX en estos campos. Fue el primero en construir un instrumento para medir flujo de carga (corriente). La unidad de corriente eléctrica fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: AIP Emilio Segrè Visual Archives).

EJEMPLO 2–3 Diez coulombs de carga fluyen más allá de cierto punto en un alambre en 2 s. ¿Cuál es la corriente en amperes?

Solución

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{10\ \text{C}}{2\ \text{s}} = \mathbf{5\ A}$$

Problema relacionado Si 8 A de corriente circulan por el filamento de una lámpara, ¿cuántos coulombs de carga se mueven por el filamento en 1.5 s?

Resistencia

Cuando en un material existe corriente, los electrones libres se mueven en éste y de vez en cuando chocan con átomos. Estas colisiones provocan que los electrones pierdan algo de su energía, con lo cual se restringe su movimiento. Entre más colisiones haya, más se restringe el flujo de electrones. Esta restricción varía y está determinada por el tipo de material. La propiedad de un material de restringir u oponerse al flujo de electrones se llama resistencia, *R*.

La resistencia **es la oposición a la corriente.**

La resistencia se expresa en ohms, simbolizada mediante la letra griega omega (Ω).

Existe un ohm **(1 Ω) de resistencia si hay un ampere (1 A) de corriente en un material cuando se aplica un volt (1 V) al material.**

El símbolo esquemático de resistencia se muestra en la figura 2-11.



▲ **FIGURA 2–11**

Símbolo para la resistencia.

Conductancia El recíproco de la resistencia es la **conductancia**, simbolizada mediante *G*. La conductancia es una medida de la facilidad con que se establece la corriente. La fórmula es

$$G = \frac{1}{R}$$ **Ecuación 2–4**

La unidad de conductancia es el **siemens**, abreviada con S. Por ejemplo, la conductancia de un resistor de 22 **Ω** es

$$G = \frac{1}{22\ \text{k}\Omega} = 45.5\ \mu\text{S}$$

La unidad obsoleta de *mho* (ohm escrito al revés) se utilizaba antes para representar la conductancia.

BIOGRAFÍA



Georg Simon Ohm
1787–1854

Ohm nació en Bavaria y luchó por años en busca de reconocimiento para su trabajo de formular la relación entre corriente, voltaje y resistencia. Esta relación matemática se conoce hoy en día como ley de Ohm, y la unidad de resistencia fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Biblioteca del Congreso estadounidense, LC-USZ62,40943).

REPASO DE LA SECCIÓN 2–3

1. Defina el término *voltaje*.
2. ¿Cuál es la unidad de voltaje?
3. ¿Cuánto es el voltaje cuando hay 24 joules de energía para 10 coulombs de carga?
4. Defina el término *corriente* y enuncie su unidad.
5. ¿Cuántos electrones forman un coulomb de carga?
6. ¿Cuál es la corriente en amperes cuando fluyen 20 C más allá de cierto punto en un alambre en 4 s?
7. Defina el término *resistencia*.
8. Nombre la unidad de resistencia.
9. Defina un ohm.

2–4 FUENTES DE VOLTAJE Y DE CORRIENTE

Una **fuente de voltaje** proporciona energía eléctrica o fuerza electromotriz (fem), más comúnmente conocida como voltaje. El voltaje se produce por medio de energía química, energía luminosa y energía magnética combinadas con movimiento mecánico. Una fuente de corriente proporciona una corriente constante a una carga.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar una fuente de voltaje y una fuente de corriente**
  - Mencionar seis categorías de fuentes de voltaje
  - Describir la operación básica de una batería
  - Explicar cómo crea voltaje una celda solar
  - Analizar el principio de un generador
  - Describir qué proporciona una fuente electrónica de potencia

BIOGRAFÍA



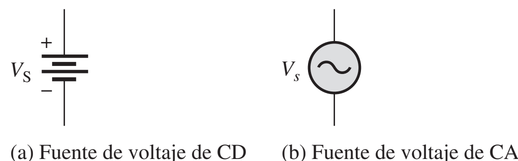
Ernst Werner von Siemens 1816–1872

Siemens nació en Prusia. Mientras se encontraba en prisión por haber participado en un duelo, comenzó a experimentar con la química, esto lo llevó a inventar el primer sistema de electrodeposición o electrochapeado. En 1837, Siemens comenzó a hacer mejoras al incipiente telégrafo y contribuyó muchísimo al desarrollo de los sistemas telegráficos. La unidad de conductancia fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: AIP Emilio Segrè Visual Archives, E. Scott Barr Collection).

La fuente de voltaje

La fuente de voltaje ideal Una fuente de voltaje ideal puede proporcionar un voltaje constante para cualquier corriente requerida por un circuito. La fuente de voltaje ideal no existe pero puede ser aproximada en la práctica. Se supondrá ideal a menos que se especifique lo contrario.

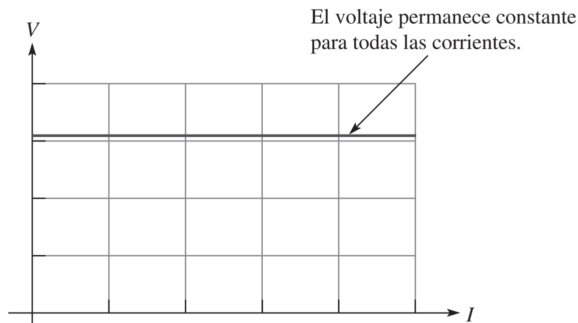
Las fuentes de voltaje pueden ser de cd o de ca. Un símbolo común para una fuente de voltaje de cd se muestra en la figura 2-12(a), y uno para una fuente de voltaje de ca lo indica la parte (b). Más adelante en el libro se utilizarán fuentes de voltaje de CA.



▶ **FIGURA 2–12**

Símbolos para fuentes de voltaje.

Una gráfica que muestra el voltaje contra la corriente para una fuente ideal de voltaje de cd recibe el nombre de característica *VI*, y se ilustra en la figura 2-13. Como puede advertirse, el voltaje es constante para cualquier corriente (dentro de ciertos límites) generada por la fuente. En el caso de una fuente de voltaje práctica conectada en un circuito, el voltaje disminuye un poco a medida que se incrementa la corriente. Siempre se extrae corriente de una fuente de voltaje cuando a ésta se conecta una carga tal como una resistencia.

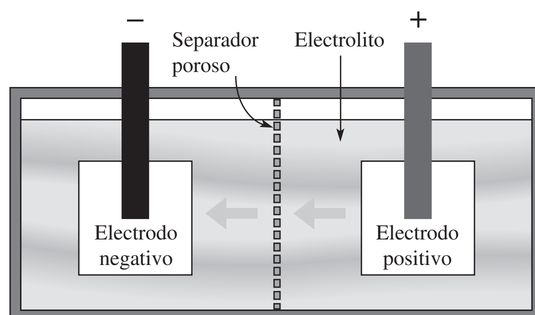


▶ **FIGURA 2–13**

Característica *VI* de una fuente de voltaje ideal.

Tipos de fuentes de voltaje de CD

Baterías Una **batería** es un tipo de fuente de voltaje que convierte energía química en energía eléctrica. Una batería se compone de una o más celdas electroquímicas conectadas eléctricamente. Una celda está constituida por cuatro componentes básicos: un electrodo positivo, un electrodo negativo, un electrolito, y un separador poroso. El *electrodo positivo* tiene deficiencia de electrones debido a una reacción química, el *electrodo negativo* tiene electrones en demasía debido a una reacción química, el *electrolito* proporciona un mecanismo para que fluya la carga entre los electrodos positivo y negativo, y el *separador* aísla eléctricamente los electrodos positivo y negativo. La figura 2-14 muestra un diagrama básico de una celda de batería.



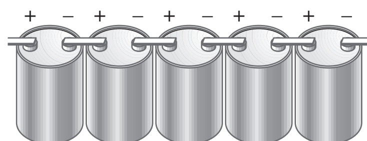
◀ **FIGURA 2–14**

Diagrama de una celda de batería.

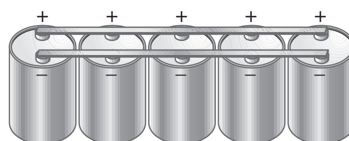
Los materiales utilizados en una celda de batería determinan el voltaje que se produce. En cada uno de los electrodos, la reacción química produce una potencial fijo. Por ejemplo, en una celda de plomo-ácido, en el electrodo positivo se produce un potencial de –1.685 V y en el negativo un potencial de +0.365 V. Esto significa que entre los dos electrodos de una celda el voltaje es de 2.05 V, lo cual es el potencial estándar en un electrodo de plomo-ácido. Factores tales como la concentración del ácido afectarán este valor hasta cierto grado, de modo que el voltaje típico de una celda de plomo-ácido comercial es de 2.15 V. El voltaje de cualquier celda de batería depende de la química de ésta. La celdas de níquel-cadmio son aproximadamente de 1.2 V, y las de litio pueden ser hasta de 4 V.

Aunque el voltaje de una celda de batería está determinado por su química, la capacidad es variable y depende de la cantidad de materiales presentes en la celda. En esencia, la *capacidad* de una celda es el número de electrones que puede ser obtenido de ella, y se mide por la cantidad de corriente que puede ser suministrada a lo largo del tiempo.

Las baterías se componen, por lo general, de múltiples celdas eléctricamente conectadas entre sí en su interior. La forma en que se conectan las celdas y su tipo determinan el voltaje y la capacidad de la batería. Si el electrodo positivo de una celda está conectado al electrodo negativo de la siguiente celda, y así sucesivamente, como se ilustra en la figura 2-15(a), el voltaje de la batería es la suma de los voltajes de las celdas individuales. Esto se llama conexión en serie. Para incrementar la capacidad de la batería los electrodos positivos de varias celdas se conectan entre sí, e igual se hace con todos los electrodos negativos, como se ilustra en la figura 2-15(b). A esto se le denomina conexión en paralelo. Además, utilizando celdas más grandes, y que por tanto tienen mayor cantidad de material, la capacidad de suministrar corriente puede ser incrementada pero el voltaje no se ve afectado.



(a) Batería conectada en serie



(b) Batería conectada en paralelo

▲ **FIGURA 2–15**

Celdas conectadas para formar baterías.

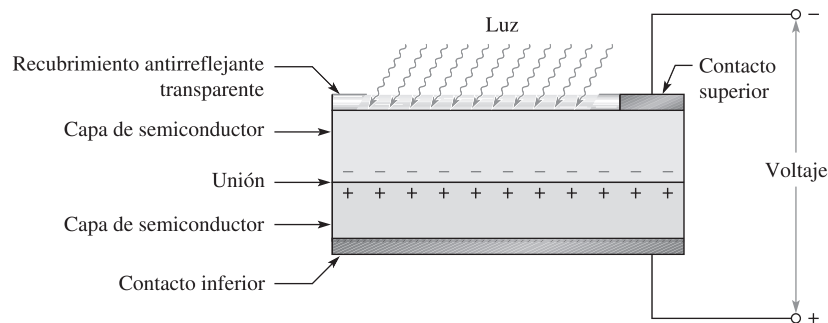
Las baterías se dividen en dos clases principales: primaria y secundaria. Las baterías primarias se utilizan una vez y luego se desechan porque sus reacciones químicas son irreversibles; las baterías secundarias pueden ser recargadas y reutilizadas muchas veces ya que se caracterizan por reacciones químicas reversibles.

Existen muchos tipos, tamaños y formas de baterías. Algunos de los tamaños más conocidos son AAA, AA, C, D y 9 V. También existe un tamaño menos común llamado AAAA, el cual es más pequeño que el AAA. Las baterías para instrumentos auditivos, relojes y otras aplicaciones en miniatura presentan, por lo general, una configuración plana y redonda y, a menudo, se conocen como baterías botón o baterías moneda. Las grandes baterías multiceldas se utilizan en linternas y aplicaciones industriales y, desde luego, está la conocida batería automotriz.

Además de los muchos tamaños y formas que presentan, generalmente las baterías se clasifican —de acuerdo con su composición química— como sigue. Cada una de estas clasificaciones están disponibles en varias configuraciones físicas.

- *Alcalina-*MnO_2 Ésta es una batería primaria que se utiliza comúnmente en computadoras tipo palma de la mano, equipo fotográfico, juguetes, radios y grabadoras.
- *Litio-*MnO_2 Es una batería primaria que se utiliza generalmente en equipo fotográfico y electrónico, alarmas contra humo, organizadores personales, respaldo de memoria, y equipo de comunicaciones.
- *Zinc aire* Batería primaria empleada a menudo en instrumentos auditivos, dispositivos de monitoreo médico, localizadores, y en otras aplicaciones que utilizan frecuencia.
- *Óxido de plata* Ésta es una batería primaria muy utilizada en relojes, equipo fotográfico, instrumentos auditivos y artefactos electrónicos que requieren baterías de alta capacidad.
- *Híbridas de níquel-metal* Batería secundaria (recargable) utilizada comúnmente en computadoras portátiles, teléfonos celulares, videograbadoras y otros aparatos electrónicos.
- *Plomo-ácido* Batería secundaria (recargable) que a menudo se utiliza en aplicaciones automotrices, marinas y similares.

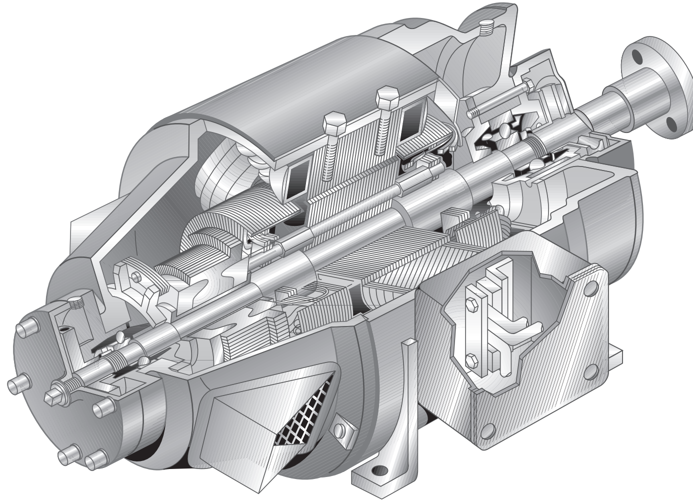
Celdas solares La operación de las celdas solares se basa en el **efecto fotovoltaico**, que es el proceso mediante el cual la energía luminosa se convierte directamente en energía eléctrica. Una celda solar básica se compone de dos capas de diferentes tipos de materiales semiconductores asociados para formar una unión. Cuando una capa se expone a la luz, muchos electrones adquieren la energía suficiente como para desprenderse de sus átomos padre y cruzar la unión. Este proceso forma iones negativos en un lado de la unión y positivos en el otro y, por tanto, se desarrolla una diferencia de potencial (voltaje). La figura 2-16 muestra la construcción de una celda solar básica.



▲ **FIGURA 2–16**

Construcción de una celda solar básica.

Generador Los generadores **eléctricos** convierten la energía mecánica en energía eléctrica por medio de un principio llamado *inducción electromagnética* (vea el Cap. 10). Se hace girar un conductor a través de un campo magnético, y de este modo se produce un voltaje que pasa por el conductor. La figura 2-17 ilustra un generador típico.



▲ **FIGURA 2–17**

Vista de corte de un generador de voltaje de cd.

La fuente de potencia electrónica Las **fuentes de potencia electrónica** convierten el voltaje de ca de una toma de corriente de pared en voltaje constante de cd que está disponible a través de dos terminales, como se indica en la figura 2-18(a). En la figura 2-18(b) se muestran fuentes de potencia comerciales típicas.

Termopares El **termopar** es una fuente de voltaje tipo termoeléctrica utilizada comúnmente para detectar temperatura. Un termopar se forma por la unión de dos metales disimilares y su operación se basa en el **efecto Seebeck**, el cual describe el voltaje generado en la unión de los metales como una función de la temperatura.

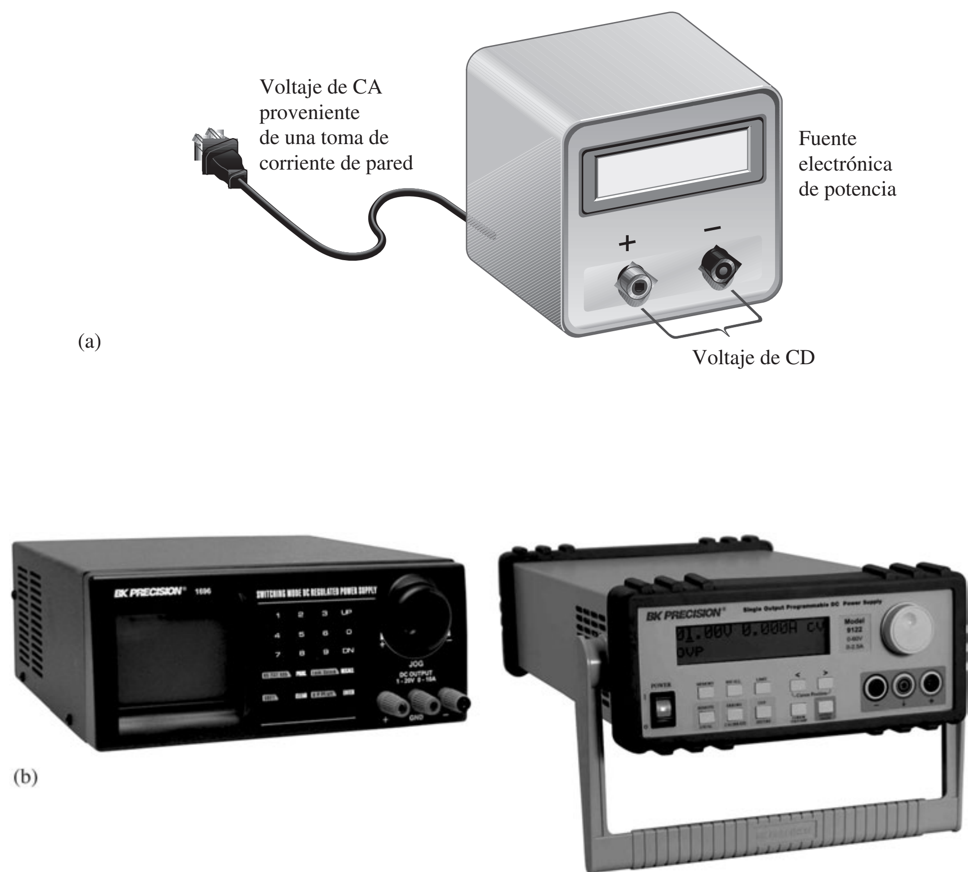
Los metales específicos utilizados caracterizan los tipos estándar de termopar. Estos termopares estándar producen voltajes de salida predecibles en un intervalo de temperaturas. El más común es el tipo K, fabricado en cromel y alumel. Otros tipos también se designan mediante las letras E, J, N, B, R y S. La mayoría de los termopares están disponibles en forma de alambre o sensor.

Sensores piezoeléctricos Estos sensores actúan como fuentes de voltaje y están basados en el **efecto piezoeléctrico**, en el cual se genera voltaje cuando un material piezoeléctrico es deformado mecánicamente por una fuerza externa. El cuarzo y la cerámica son dos tipos de material piezoeléctrico. Se utilizan sensores piezoeléctricos en sensores de presión, de fuerza, acelerómetros, micrófonos, dispositivos ultrasónicos, y en muchas otras aplicaciones.

La fuente de corriente

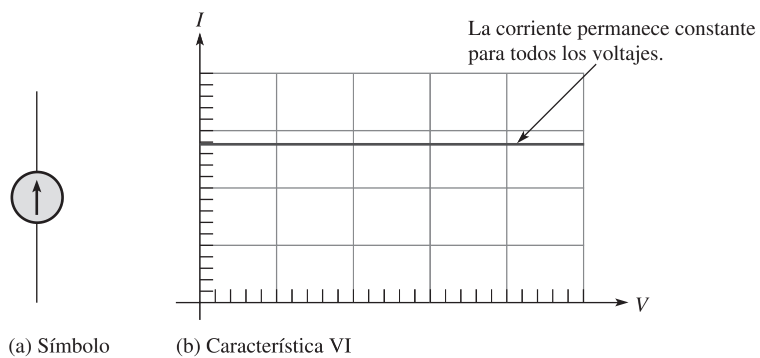
La fuente de corriente ideal Como se sabe, una fuente de voltaje ideal puede proporcionar voltaje constante para cualquier carga. Una **fuente de corriente** ideal puede proporcionar una corriente constante para cualquier carga. Al igual que en el caso de una fuente de voltaje, la fuente de corriente ideal no existe pero puede ser aproximada en la práctica. Se supondrá ideal a menos que se especifique lo contrario.

El símbolo utilizado para identificar una fuente de corriente se muestra en la figura 2-19(a). La característica *IV* de una fuente de corriente ideal es una línea horizontal como la ilustrada por la figura 2-19(b). Observe que la corriente es constante para cualquier voltaje de la fuente de corriente.



▲ **FIGURA 2–18**

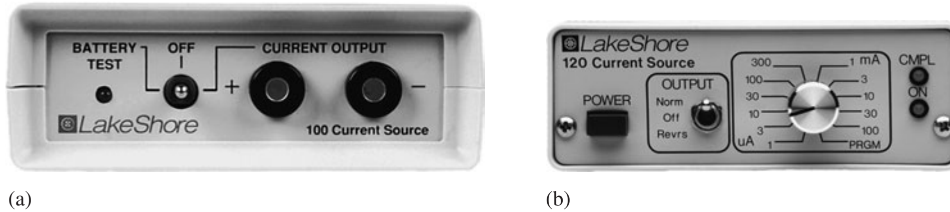
Fuentes electrónicas de potencia. (Cortesía de B+K Precision).



▲ **FIGURA 2–19**

Fuente de corriente.

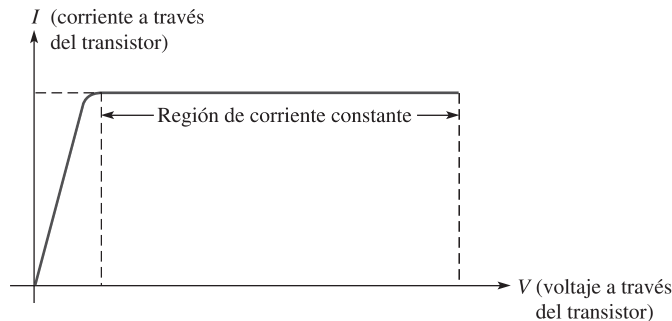
Fuentes de corriente reales A las fuentes de potencia normalmente se les considera como fuentes de voltaje porque son la fuente más común que se encuentra en el laboratorio. Sin embargo, también las fuentes de corriente pueden ser consideradas como un tipo de fuente de potencia. En la figura 2-20 se ilustran fuentes de corriente constante comerciales típicas.



◀ **FIGURA 2–20**

Fuentes de corriente comerciales típicas. (Cortesía de Lake Shore Cryotronics).

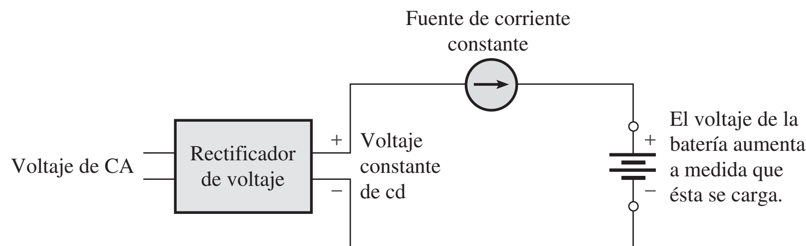
En la mayoría de los circuitos transistorizados, el transistor actúa como fuente de corriente porque una parte de la curva característica *IV* es una línea horizontal como lo muestra la característica de transistor ilustrada en la figura 2-21. La parte plana de la gráfica indica dónde es constante la corriente del transistor dentro de un intervalo de voltajes. La región de corriente constante se utiliza para formar una fuente de corriente constante.



◀ **FIGURA 2–21**

Curva característica de un transistor para mostrar la región de corriente constante.

Una aplicación común de una fuente de corriente constante se encuentra en los cargadores de batería de corriente constante, tal como se ilustra en forma simplificada en la figura 2-22. El rectificador es un circuito que actúa como fuente de voltaje de cd al convertir el voltaje de ca proveniente de una toma de corriente de pared estándar en un voltaje de cd constante. Ese voltaje es aplicado efectivamente en paralelo con una batería que va a ser cargada y en serie con una fuente de corriente constante. El voltaje de la batería inicialmente está bajo, pero con el tiempo se incrementa debido a la corriente de carga constante. El voltaje total a través de la fuente de corriente es el voltaje del rectificador menos el de la batería, el cual se incrementa conforme la batería se carga.



◀ **FIGURA 2–22**

Cargador de batería como ejemplo de una aplicación de fuente de corriente.

REPASO DE LA SECCIÓN 2–4

1. Defina una fuente de voltaje.
2. Explique cómo produce voltaje una batería.
3. Describa cómo produce voltaje una celda solar.
4. Analice cómo crea voltaje un generador eléctrico.

5. Explique lo que hace una fuente de potencia electrónica.
6. Defina una fuente de corriente.
7. Nombre un componente electrónico que se utilice como fuente de corriente.

2–5 RESISTORES

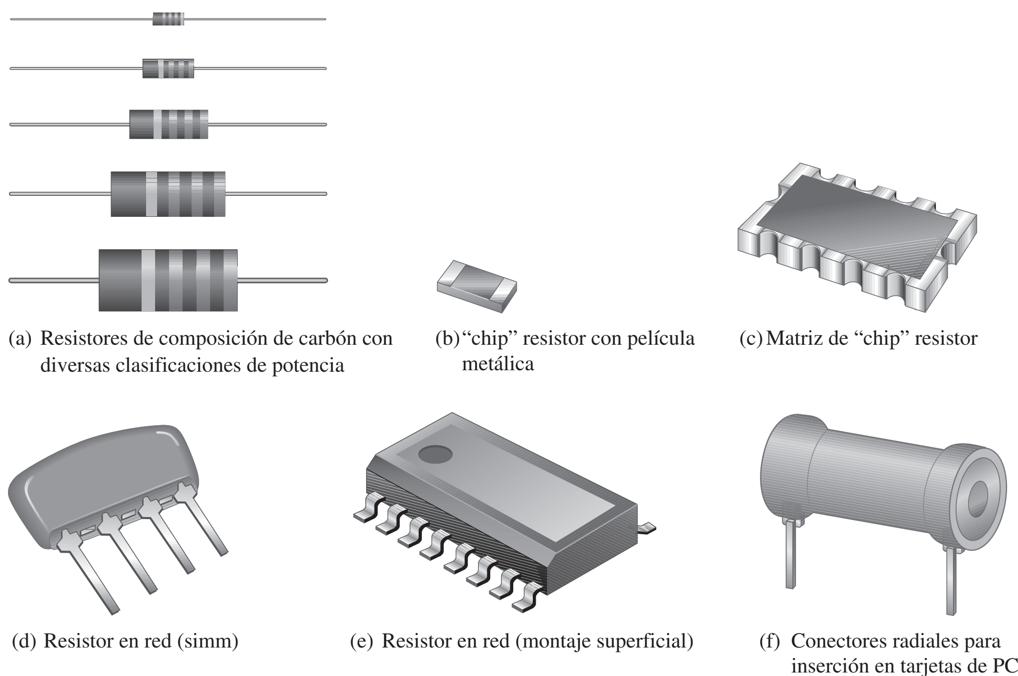
Un componente diseñado específicamente para que tenga cierta cantidad de resistencia se llama **resistor.** La aplicación principal de los resistores es limitar la corriente en un circuito, dividir el voltaje, y, en ciertos casos, generar calor. Aun cuando los resistores vienen en muchas formas y tamaños, todos pueden ser colocados en dos categorías principales: fijos y variables.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Reconocer y analizar diversos tipos y valores de resistores**
  - Distinguir entre resistores fijos y resistores variables
  - Saber cómo el tamaño físico de un resistor determina su capacidad de disipar potencia
  - Leer un código de colores u otra designación para determinar el valor de resistencia
  - Describir cómo se construyen ciertos resistores

Resistores fijos

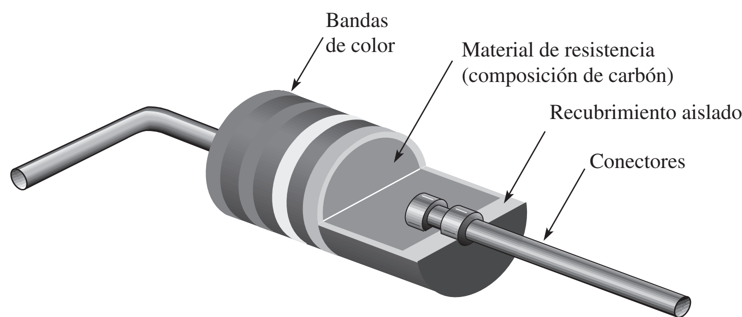
Los resistores fijos están disponibles con una gran selección de valores de resistencia establecidos durante su fabricación y que no son fáciles de cambiar. Se construyen utilizando diversos métodos y materiales. La figura 2-23 muestra varios tipos comunes.



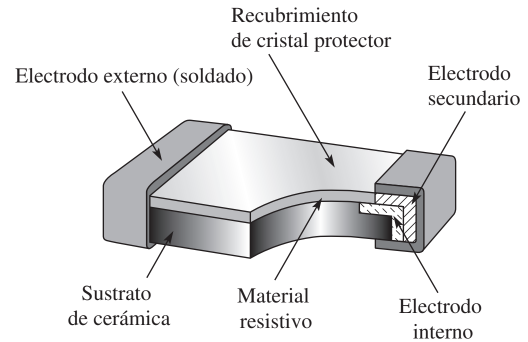
▲ FIGURA 2–23

Resistores fijos típicos.

Un tipo común de resistor fijo es el de composición de carbón, el cual está hecho con una mezcla de carbón finamente pulverizado, un relleno aislante, y un aglutinante de resina. La proporción de carbón a relleno aislante establece el valor de resistencia. La mezcla se hace en forma de varillas, y se realizan las conexiones conductoras. Luego se encapsula todo el resistor en un recubrimiento aislado para protección. La figura 2-24(a) muestra la construcción de un resistor de carbón típico.



(a) Vista de corte de un resistor de composición de carbón



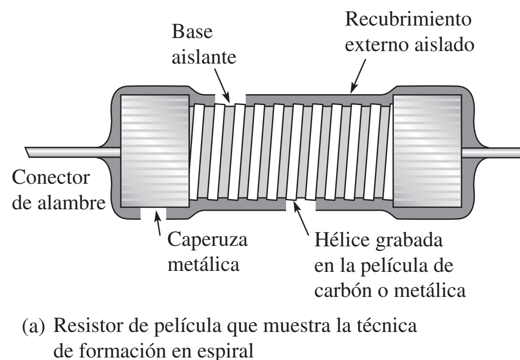
(b) Vista de corte de un "chip" resistor en miniatura

▲ **FIGURA 2–24**

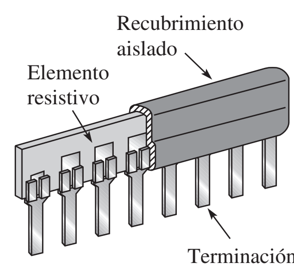
Dos tipos de resistores fijos (no se muestran a escala).

El "chip" resistor es otro tipo de resistor fijo y se encuentra en la categoría de componentes de tecnología de montaje superficial (SMT, por sus siglas en inglés). Tiene la ventaja de un tamaño muy pequeño para ensambles compactos. La figura 2-24(b) muestra la construcción de un chip resistor.

Otros tipos de resistores fijos incluyen película de carbón, película metálica, y devanado de alambre. En los resistores de película, se deposita uniformemente una película resistiva (película de carbón) o de cromo níquel (película metálica). En estos tipos de resistor, el valor de resistencia deseado se obtiene al retirar una parte del material resistivo siguiendo un patrón helicoidal a lo largo de la varilla mediante una técnica de formación en espiral, como indica la figura 2-25(a). Se puede lograr una **tolerancia** muy estrecha con este método. Los resistores de película también están disponibles en forma de redes de resistores, figura 2-25(b).



(a) Resistor de película que muestra la técnica de formación en espiral



(b) Resistor en red

◀ **FIGURA 2–25**

Vistas de construcción de resistores de película típicos.

Los resistores devanados de alambre se construyen con un alambre resistivo devanado alrededor de una varilla aislante y luego se sellan. Estos resistores se utilizan, normalmente, en aplicaciones que requieren valores de potencia más altos. Como se construyen con una aduja de alambre, los resistores devanados de alambre tienen una inductancia significativa y no se utilizan a frecuencias altas. En la figura 2-26 se muestran algunos resistores devanados de alambre típicos.



▲ **FIGURA 2–26**

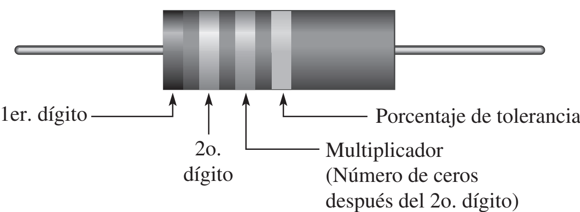
Resistores de potencia devanados de alambre típicos.

Códigos de color para resistores

Los resistores fijos con tolerancias de valor del 5 o el 10% se codifican mediante cuatro bandas de color para indicar el valor de resistencia y la tolerancia. Este sistema de bandas de código de color se muestra en la figura 2-27, y el código de colores aparece en la tabla 2-1. Las bandas siempre están cerca de un extremo.

▶ **FIGURA 2–27**

Bandas de código de color en un resistor de 4 bandas.



El código de colores se lee como sigue:

1. Inicie con la banda más cercana a un extremo del resistor. La primera banda es el primer dígito del valor de resistencia. Si no está claro cuál es el extremo más cercano a una banda, inicie por el extremo que no comience con una banda de color oro o plata.

▶ **TABLA 2–1**

Código de colores para resistores de 4 bandas.

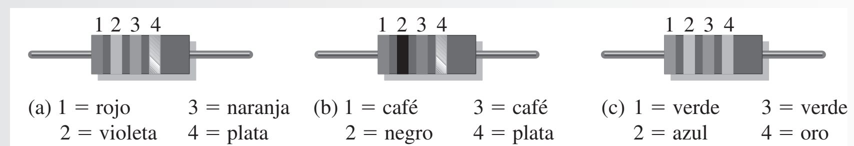
	Dígito	Color
Valor de la resistencia, primeros tres dígitos: Primera banda-1er. dígito; Segunda banda-2o. dígito; Tercera banda-multiplicador (número de ceros después del 2o. dígito)	0	Negro
	1	Café
	2	Rojo
	3	Naranja
	4	Amarillo
	5	Verde
	6	Azul
	7	Violeta
	8	Gris
	9	Blanco
Cuarta banda-tolerancia	±5%	Oro
	±10%	Plata

2. La segunda banda es el segundo dígito del valor de resistencia.
3. La tercer banda es el número de ceros que van después del segundo dígito, o el multiplicador.
4. La cuarta banda indica la tolerancia en porcentaje y, por lo general, es de color oro o plata.

Por ejemplo, una tolerancia del 5% significa que el valor de resistencia *real* se encuentra dentro de ±5% del valor indicado por el código de colores. Por tanto, un resistor de 100 Ω con una tolerancia de ±5% puede tener un intervalo aceptable de valores desde un mínimo de 95 Ω hasta un máximo de 105 Ω.

En el caso de valores de resistencia menores que 10 Ω, la tercera banda es de color oro o plata. El color oro representa un multiplicador de 0.1, y el plata representa 0.01. Por ejemplo, un código de colores rojo, violeta, oro y plata representa 2.7 Ω con tolerancia de ±10%. En el apéndice A se proporciona una tabla de valores de resistencia estándar.

EJEMPLO 2–4 Encuentre el valor de resistencia en ohms y la tolerancia en porcentaje para cada uno de los resistores con código de colores mostrados en la figura 2-28. (Vea los valores en la columna de la izquierda).



▲ **FIGURA 2–28**

Solución

(a) La primera banda es roja = 2, la segunda es violeta = 7, la tercera es naranja = 3 ceros, y la cuarta es plata = tolerancia del 10%.

$$R = \mathbf{27{,}000\ \Omega \pm 10\%}$$

(b) La primera banda es café = 1, la segunda es negra = 0, la tercera es café = 1 cero, y la cuarta es plata = tolerancia del 10%.

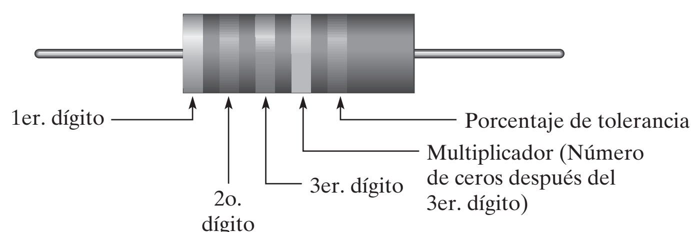
$$R = \mathbf{100\ \Omega \pm 10\%}$$

(c) La primera banda es verde = 5, la segunda es azul = 6, la tercera es verde = 5 ceros, y la cuarta es oro = tolerancia del 5%.

$$R = \mathbf{5{,}600{,}000\ \Omega \pm 5\%}$$

Problema relacionado Cierto resistor tiene una primera banda amarilla, una segunda violeta, una tercera roja y una cuarta oro. Determine su valor en ohms y su tolerancia en porcentaje.

Código de colores de cinco bandas Ciertos resistores de precisión con tolerancias del 2%, 1% o menos se codifican, en general, mediante cinco bandas de colores, tal como indica la figura 2-29. Se inicia con la banda más cercana a un extremo. La primera banda es el primer dígito del valor de resistencia, la segunda es el segundo dígito, la tercera el tercer dígito, la cuarta es el multiplicador (número de ceros después del tercer dígito), y la quinta banda indica la tolerancia en porcentaje. La tabla 2-2 muestra el código de colores de 5 bandas.



◀ **FIGURA 2–29**

Bandas de código de color en un resistor de 5 bandas.

▶ TABLA 2–2

Código de colores para resistores de 5 bandas.

	DÍGITO	COLOR
Valor de la resistencia, primeras tres bandas:	0	Negro
	1	Café
Primera banda-1er. dígito	2	Rojo
Segunda banda-2o. dígito	3	Naranja
Tercera banda-3er. dígito	4	Amarillo
Cuarta banda-multiplicador	5	Verde
(número de ceros después	6	Azul
del 3er. dígito)	7	Violeta
	8	Gris
	9	Blanco
Cuarta banda-multiplicador	0.1	Oro
	0.01	Plata
Quinta banda-tolerancia	±2%	Rojo
	±1%	Café
	±0.5%	Verde
	±0.25%	Azul
	±0.1%	Violeta

Banda de confiabilidad en resistores En algunos resistores codificados con bandas de colores, una banda extra indica la confiabilidad de los resistores en un porcentaje de fallas por cada 1000 horas (1000 h) de uso. El código de colores de confiabilidad aparece en la tabla 2-3. Por ejemplo, una quinta banda café en un resistor con código de 4 bandas de color significa que si un grupo de resistores similares se pone a operar en condiciones estándar durante 1000 h, el 1% de los resistores de dicho grupo fallará.

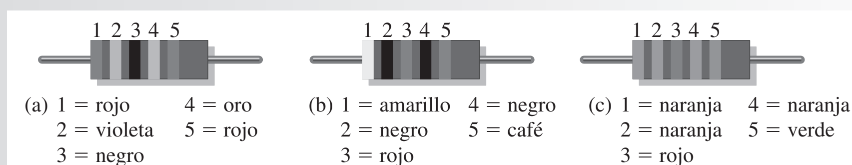
Los resistores, así como otros componentes, deben ser operados sustancialmente por debajo de sus valores nominales para mejorar su confiabilidad.

▶ TABLA 2–3

Código de colores de confiabilidad.

COLOR	FALLAS DURANTE 1000 h DE OPERACIÓN
Café	1.0%
Rojo	0.1%
Naranja	0.01%
Amarillo	0.001%

EJEMPLO 2–5 Encuentre el valor de resistencia en ohms y la tolerancia en porcentaje para cada uno de los resistores codificados con bandas de colores mostrados en la figura 2-30. (Vea los valores en la columna).



▲ FIGURA 2–30

Solución **(a)** La primera banda es roja = 2, la segunda es violeta = 7, la tercera es negra = 0, la cuarta es oro = ×0.1, y la quinta es roja = ±2% de tolerancia.

$$R = 270 \times 0.1 = \mathbf{27\ \Omega \pm 2\%}$$

(b) La primera banda es amarilla = 4, la segunda es negra = 0, la tercera es roja = 2, la cuarta es negra = 0, y la quinta es café = ±1% de tolerancia.

$$R = \mathbf{402\ \Omega \pm 1\%}$$

(c) La primera banda es naranja = 3, la segunda es naranja = 3, la tercera es roja = 2, la cuarta es naranja = 3, y la quinta es verde = ±5% de tolerancia.

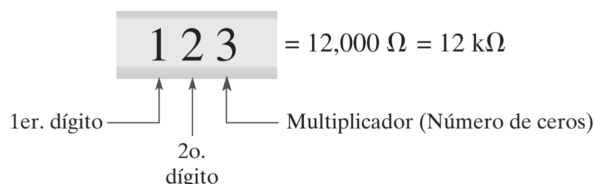
$$R = \mathbf{332{,}000\ \Omega \pm 0.5\%}$$

Problema relacionado Cierto resistor tiene una primera banda amarilla, una segunda violeta, una tercera verde, una cuarta oro, y una quinta roja. Determine su valor en ohms y su tolerancia en porcentaje.

Códigos de rotulado para resistores

No todos los tipos de resistores se codifican con bandas de color. Muchos, incluidos los de montaje superficial, utilizan marcado tipográfico para indicar su valor de resistencia y su tolerancia. Estos códigos de rotulado se componen de puros números (numéricos) o de una combinación de números y letras (alfanuméricos). En algunos casos, cuando el cuerpo del resistor es lo suficientemente grande, el valor de resistencia completo y la tolerancia se imprimen en él en forma estándar.

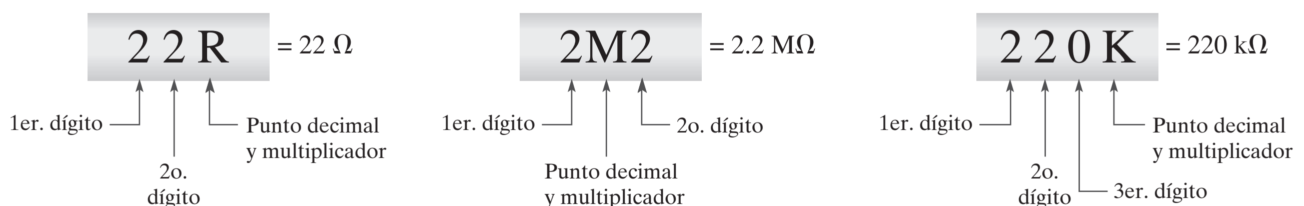
Rotulación numérica Este tipo de marcado utiliza tres dígitos para indicar el valor de resistencia, tal como indica la figura 2-31 por medio de un ejemplo específico. Los primeros dos dígitos proporcionan los primeros dos dígitos del valor de resistencia, y el tercer dígito corresponde al multiplicador o cantidad de ceros que van después de los primeros dos dígitos. Este código está limitado a valores de 10 Ω o más grandes.



◀ **FIGURA 2–31**

Ejemplo de rotulación de tres dígitos para un resistor.

Rotulación alfanumérica Otro tipo común de marcado es un rótulo de tres o cuatro caracteres que utiliza tanto dígitos como letras. Este tipo de rótulo se compone, en general, de sólo tres dígitos o de dos o tres dígitos y una de las letras R, K o M. La letra se utiliza para indicar el multiplicador, y su posición señala el lugar del punto decimal. La letra R significa un multiplicador de 1 (nada de ceros después de los dígitos), la K indica un multiplicador de 1000 (tres ceros después de los dígitos), y la M indica un multiplicador de 1,000,000 (seis ceros después de los dígitos). En este formato, los valores que van desde 100 hasta 999 se componen de tres dígitos y ninguna letra para representar los tres dígitos presentes en el valor de resistencia. La figura 2-32 muestra tres ejemplos de este tipo de rotulado de resistores.



▲ **FIGURA 2–32**

Ejemplos de la rotulación alfanumérica de resistores.

EJEMPLO 2–6 Interprete los siguientes rotulados alfanuméricos para resistor:

(a) 470 **(b)** 5R6 **(c)** 68K **(d)** 10M **(e)** 3M3

Solución **(a)** 470 = **470 Ω** **(b)** 5R6 = **5.6 Ω** **(c)** 68K = **68 kΩ**

(d) 10M = **10 MΩ** **(e)** 3M3 = **3.3 MΩ**

Problema relacionado ¿Cuál es la resistencia indicada por 1K25?

Un sistema de rotulado para valores de tolerancia y resistencia utiliza las letras F, G y J:

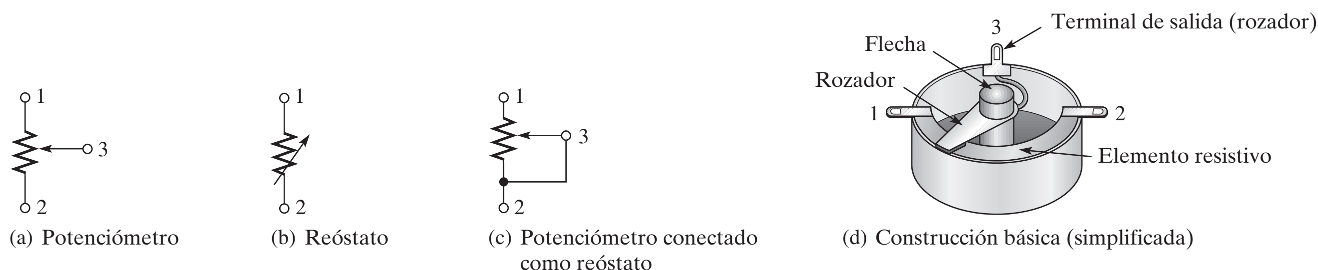
F = ±1% G = ±2% J = ±5%

Por ejemplo, 620F indica un resistor de 620 Ω con tolerancia de ±1%, 4R6G es un resistor de 4.6 Ω ±2%, y 56KJ es un resistor de 56 kΩ ±5 por ciento.

Resistores variables

Los resistores variables están diseñados de modo que sus valores de resistencia sean fáciles de cambiar mediante un ajuste manual o automático.

Dos usos básicos de los resistores variables son dividir el voltaje y controlar la corriente. El resistor variable utilizado para dividir voltaje se llama **potenciómetro.** El resistor variable empleado para controlar corriente se denomina **reóstato**. En la figura 2-33 se muestran símbolos esquemáticos para estos tipos. El potenciómetro es un dispositivo de tres terminales, como se indica en la parte (a). Las terminales 1 y 2 tienen resistencia fija entre ellas, que es la resistencia total. La terminal 3 está conectada a un contacto móvil (**rozador**). Se puede variar la resistencia entre 3 y 1 o entre 3 y 2 subiendo o bajando el contacto.



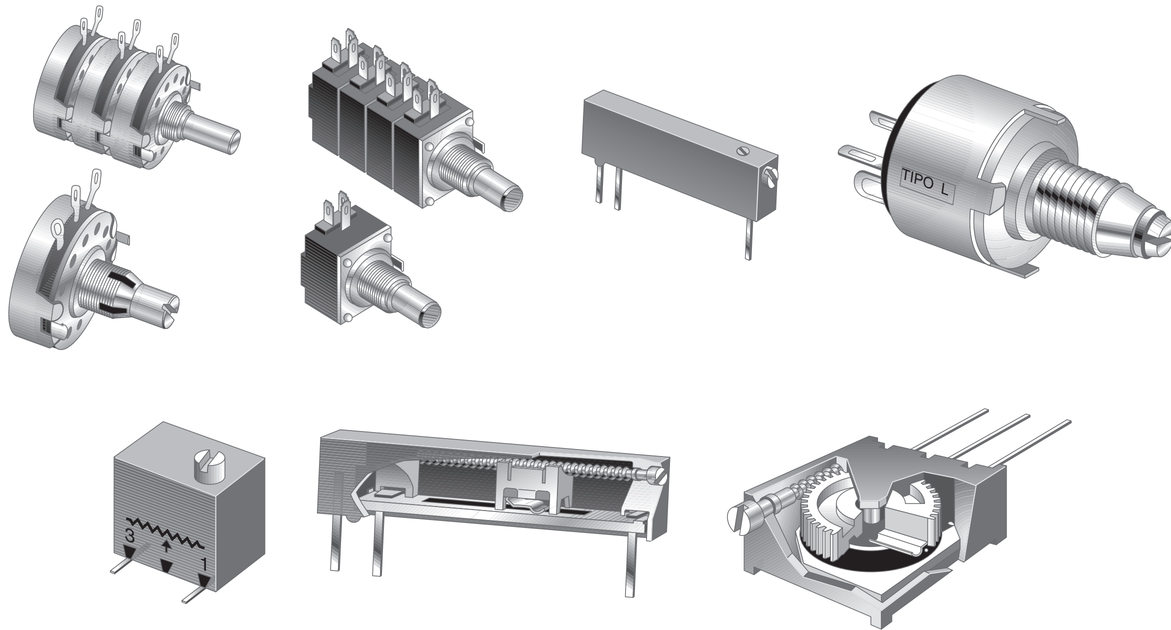
(a) Potenciómetro (b) Reóstato (c) Potenciómetro conectado como reóstato (d) Construcción básica (simplificada)

▲ **FIGURA 2–33**

Símbolos de potenciómetro y reóstato y construcción básica de un tipo de potenciómetro.

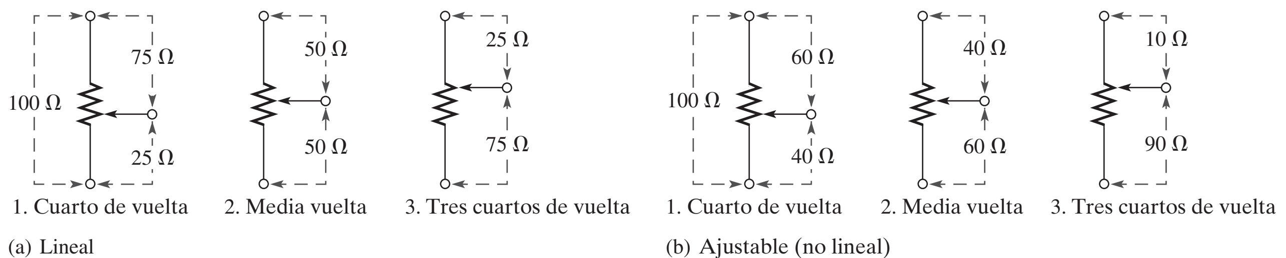
La figura 2-33(b) muestra el reóstato como un resistor variable de dos terminales. La parte (c) indica de qué modo se puede utilizar un potenciómetro como reóstato conectando la terminal 3 a las terminales 1 o 2. Las partes (b) y (c) son símbolos equivalentes. La parte (d) ilustra un diagrama de construcción simplificado de un potenciómetro (el cual también puede ser configurado como un reóstato). Algunos potenciómetros típicos aparecen en la figura 2-34.

Los potenciómetros y reóstatos pueden ser clasificados como lineales o no lineales (ajustables), según indica la figura 2-35, donde se utiliza como ejemplo un potenciómetro con resistencia total de 100 Ω. De acuerdo con la parte (a), en un potenciómetro lineal, la resistencia entre una u otra terminales y el contacto móvil varía linealmente con la posición del contacto móvil. Por ejemplo, la mitad del movimiento total del contacto produce la mitad de la resistencia total. Tres cuartos de movimiento total producen tres cuartos de la resistencia total entre el contacto móvil y una terminal, o un cuarto de la resistencia total entre la otra terminal y el contacto móvil.



▲ **FIGURA 2–34**

Potenciómetros típicos y dos vistas de construcción.



▲ **FIGURA 2–35**

Ejemplos de potenciómetros lineales y ajustables.

En el potenciómetro no lineal (**ajustable**), la resistencia no varía linealmente con la posición del contacto móvil, de modo que la mitad de una vuelta no necesariamente produce la mitad de la resistencia total. Este concepto se ilustra en la figura 2-35(b), donde los valores no lineales son arbitrarios.

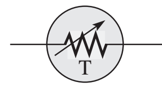
El potenciómetro se utiliza como un dispositivo de control de voltaje porque cuando se aplica un voltaje fijo a través de las terminales extremas, se obtiene un voltaje variable en el contacto rozante con respecto a una u otra terminales. El reóstato es empleado como dispositivo de control de corriente porque ésta puede ser cambiada al variar la posición del contacto rozante.

Dos tipos de resistores automáticamente variables Un **termistor** es un tipo de resistor variable sensible a la temperatura. Cuando su coeficiente de temperatura es negativo, la resistencia cambia inversamente con la temperatura. Cuando su coeficiente es positivo, la resistencia cambia directamente con la temperatura.

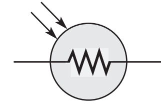
La resistencia de una **celda fotoconductora** cambia con un cambio de la intensidad luminosa. Esta celda también tiene un coeficiente de temperatura negativo. En la figura 2-36 se muestran símbolos para estos dos dispositivos. A veces se utiliza la letra griega lambda (λ) junto con el símbolo de celda fotoconductora.

▶ FIGURA 2–36

Símbolos para dispositivos resistivos sensibles a la temperatura y a la luz.



(a) Termistor

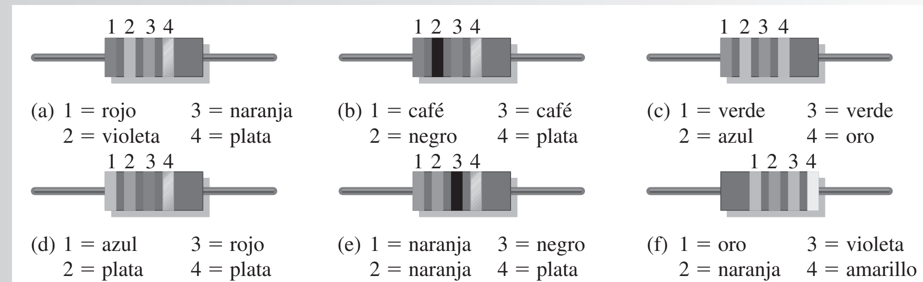


(b) Celda fotoconductora

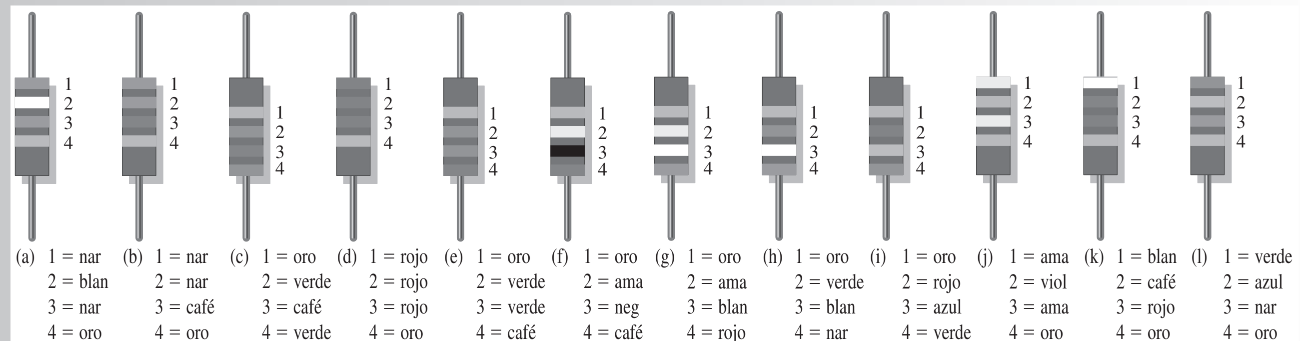
REPASO DE LA SECCIÓN 2–5

1. ¿Cuáles son las principales categorías de resistores? Explique brevemente la diferencia entre ellas.
2. En el código de bandas de color para resistores, ¿qué representa cada banda?
3. Determine la resistencia y la tolerancia en porcentaje de cada uno de los resistores mostrados en la figura 2-37.

▶ FIGURA 2–37



4. De entre los resistores mostrados en la figura 2-38, elija los siguientes valores: 330 Ω, 2.2 kΩ, 56 kΩ, 100 kΩ, y 39 kΩ.



▲ FIGURA 2–38

5. ¿Qué valor de resistencia indica cada rotulado alfanumérico:
   (a) 33R **(b)** 5K6 **(c)** 900 **(d)** 6M8
6. ¿Cuál es la diferencia básica entre un reóstato y un potenciómetro?
7. ¿Qué es un termistor?

2–6 EL CIRCUITO ELÉCTRICO

Un circuito eléctrico básico es una agrupación ordenada de componentes físicos que utilizan voltaje, corriente y resistencia para realizar alguna función útil.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir un circuito eléctrico básico**
  - Relacionar un esquema con un circuito físico
  - Definir los términos de *circuito abierto* y *circuito cerrado*

- Describir varios tipos de dispositivos de protección
- Describir varios tipos de interruptores
- Explicar cómo se relacionan los tamaños de alambre a números de calibre
- Definir el término *tierra* o *común*

Dirección de la corriente

Durante algunos años después del descubrimiento de la electricidad, las personas suponían que toda la corriente se componía de cargas positivas móviles. Sin embargo, en los años de 1890, se identificó al electrón como el portador de carga en conductores sólidos.

Hoy día, existen dos convenciones aceptadas en cuanto a la dirección de la corriente eléctrica. La *dirección del flujo de electrones*, preferida por muchos en los campos de la tecnología eléctrica y electrónica, supone para propósitos de análisis que la corriente sale de la terminal negativa de una fuente de voltaje, a través del circuito, y hacia la terminal positiva de la fuente. La *dirección convencional de la corriente* supone, también para propósitos de análisis, que la corriente sale de la terminal positiva de una fuente de voltaje, a través del circuito, y hacia la terminal negativa de la fuente. Cuando se sigue la dirección convencional de la corriente, el voltaje se eleva a través de una fuente (negativo a positivo) y se reduce al cruzar un resistor (positivo a negativo).

Como en realidad no se puede ver la corriente, sólo sus efectos, no importa qué dirección se suponga en tanto sea utilizada *consistentemente*. Los resultados del análisis de un circuito eléctrico no se ven afectados por la dirección de la corriente supuesta para propósitos analíticos. La dirección utilizada para análisis es, principalmente, una cuestión de preferencia, y existen muchas propuestas sobre cada una de las modalidades.

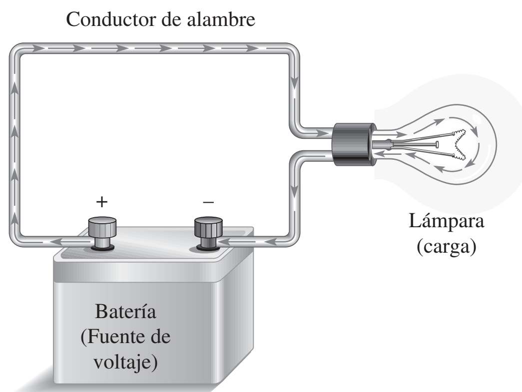
La dirección convencional de la corriente se utiliza también en la tecnología electrónica y casi exclusivamente a nivel de ingeniería. Esta dirección convencional de la corriente se utiliza a lo largo de este texto. También está disponible una versión alterna del libro en la cual se emplea la dirección del flujo de electrones.

NOTA DE SEGURIDAD

Para evitar un choque eléctrico, nunca toque un circuito mientras esté conectado a una fuente de voltaje. Si necesita manipularlo, quitar o cambiar un componente, primero asegúrese de que la fuente de voltaje está desconectada.

El circuito básico

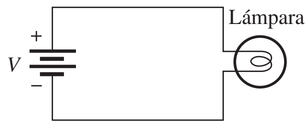
De modo básico, un **circuito** se compone de una fuente de voltaje, una carga, y una trayectoria para la corriente que haya entre la fuente y la carga. La figura 2-39 muestra en forma pictórica el ejemplo de un circuito eléctrico simple: una batería conectada a una lámpara con dos conductores (alambres). La batería es la fuente de voltaje, la lámpara es la **carga** aplicada a la batería porque absorbe corriente de ésta, y los dos alambres proporcionan la trayectoria necesaria para que la corriente vaya desde la terminal positiva de la batería hasta la lámpara y de regreso a la terminal negativa de la batería. La corriente pasa por el filamento de la lámpara (la cual tiene resistencia), ello hace que emita luz visible. En la batería, la corriente ocurre por acción química.



◀ **FIGURA 2–39**

Un circuito eléctrico simple.

En muchos casos prácticos, una terminal de la batería está conectada a un punto común o tierra. Por ejemplo, en la mayoría de los automóviles, la terminal negativa de la batería se conecta al chasis metálico del automóvil. El chasis es la tierra del sistema eléctrico del automóvil y actúa como conductor que completa el circuito.



▲ FIGURA 2–40

Diagrama del circuito de la figura 2-39.

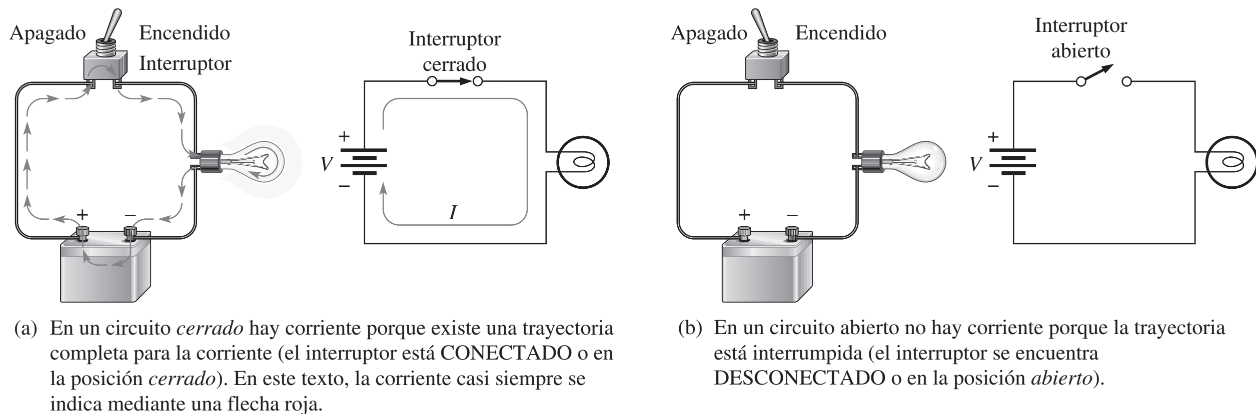
El diagrama esquemático de un circuito eléctrico Un circuito eléctrico puede ser representado mediante un ***diagrama esquemático*** que utiliza símbolos estándar para identificar cada elemento, como indica la figura 2-40 para el circuito simple de la figura 2-39. Un diagrama esquemático muestra, de manera organizada, cómo están interconectados los diversos componentes de un circuito dado para que la operación del circuito pueda ser determinada.

Protección y control de la corriente en un circuito

El circuito de ejemplo mostrado en la figura 2-39 ilustra un **circuito cerrado**, esto es, un circuito en el cual la corriente recorre una trayectoria completa. Cuando la trayectoria de la corriente se interrumpe, el circuito recibe el nombre de **circuito abierto**.

Interruptores mecánicos Para controlar la apertura o el cierre de circuitos eléctricos, por lo general se utilizan **interruptores**. Por ejemplo, para encender o apagar una lámpara se utiliza un interruptor, tal como ilustra la figura 2-41. Cada ilustración de circuito se muestra junto con su diagrama esquemático asociado. El tipo de interruptor indicado es un interruptor de "volquete" de vía y polo únicos (SPST, por sus siglas en inglés). En un interruptor, el término *polo* se refiere al brazo móvil y *vía* indica el número de contactos que son afectados (o abiertos o cerrados) por una acción única del interruptor (un solo movimiento de un polo).

La figura 2-42 muestra un circuito un poco más complicado que utiliza un interruptor de doble vía y polo único (SPDT, por sus siglas en inglés) para controlar la corriente que fluye hacia

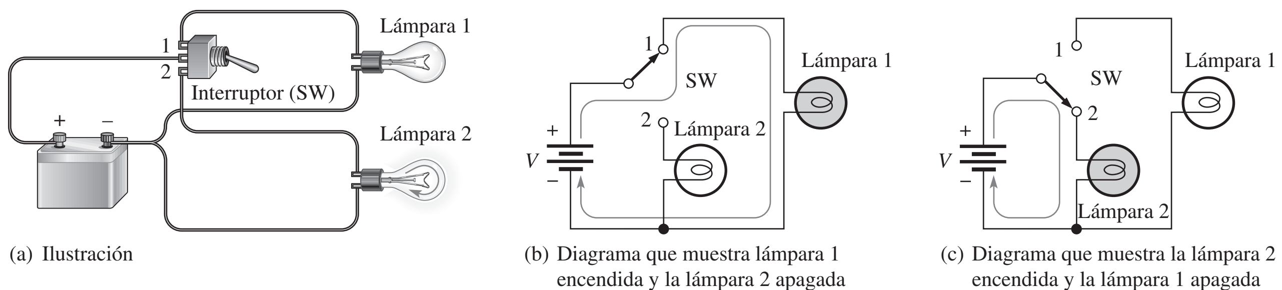


(a) En un circuito *cerrado* hay corriente porque existe una trayectoria completa para la corriente (el interruptor está CONECTADO o en la posición *cerrado*). En este texto, la corriente casi siempre se indica mediante una flecha roja.

(b) En un circuito abierto no hay corriente porque la trayectoria está interrumpida (el interruptor se encuentra DESCONECTADO o en la posición *abierto*).

▲ FIGURA 2–41

Ilustración de circuitos abiertos y cerrados que utilizan un interruptor SPST para control.



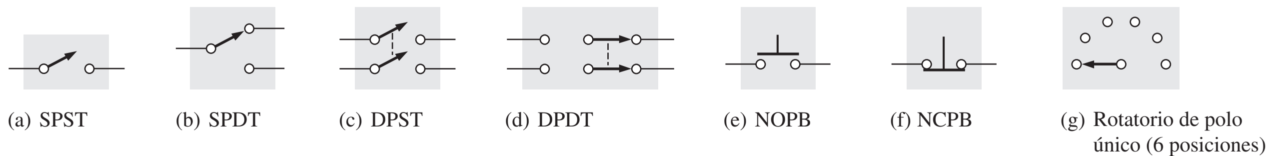
(a) Ilustración

(b) Diagrama que muestra lámpara 1 encendida y la lámpara 2 apagada

(c) Diagrama que muestra la lámpara 2 encendida y la lámpara 1 apagada

▲ FIGURA 2–42

Ejemplo de un interruptor SPDT que controla dos lámparas.



▲ **FIGURA 2–43**

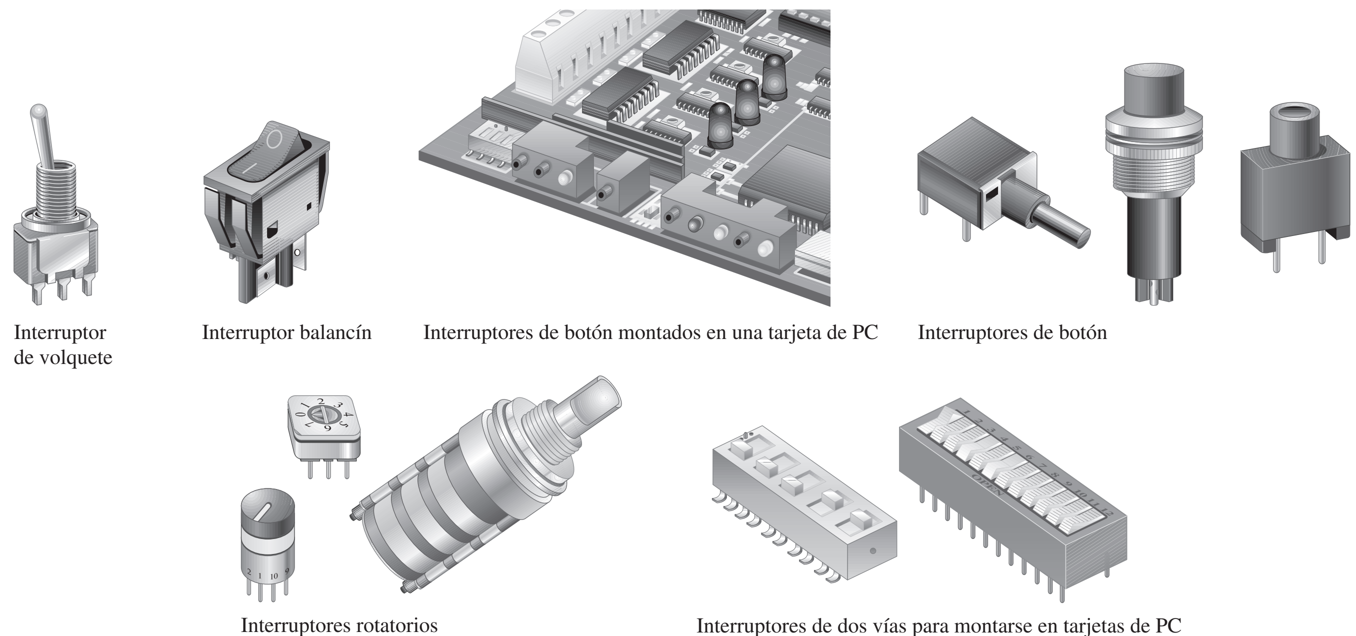
Símbolos de interruptor.

dos lámparas diferentes. Cuando una lámpara está encendida, la otra está apagada y viceversa, tal como se ilustra mediante los dos diagramas en las partes (b) y (c), los cuales representan cada una de las posiciones del interruptor.

Además de los interruptores SPST y SPDT (los símbolos se muestran en la figura 2-43(a) y (b), los siguientes tipos también son importantes.

- *Vía única-doble polo* (*DPST*, por sus siglas en inglés) El interruptor DPST permite la apertura o el cierre de dos juegos de contactos. El símbolo se muestra en la figura 2-43(c). La línea de rayas indica que los brazos de contacto están mecánicamente unidos de modo que ambos se mueven mediante una sola acción del interruptor.
- *Doble vía-doble polo* (*DPDT*, por sus siglas en inglés) El interruptor DPDT permite la conexión de un juego de contactos a uno u otro de otros dos juegos. El símbolo esquemático se muestra en la figura 2-43(d).
- *Botón pulsador* (*PB*, por sus siglas en inglés) En el interruptor de botón normalmente abierto (NOPB, por sus siglas en inglés) que muestra la figura 2-43(e), la conexión entre dos contactos se realiza cuando el botón es oprimido y se interrumpe cuando se suelta el botón. En el interruptor de botón normalmente cerrado (NCPB, por sus siglas en inglés), mostrado en la figura 2-43(f), la conexión entre los dos contactos se interrumpe cuando se oprime el botón.
- *Rotatorio* En un interruptor rotatorio, la conexión entre un contacto y cualquiera de varios otros contactos se realiza al girar una perilla. En la figura 2-43(g) se muestra un símbolo para un interruptor rotatorio simple de seis posiciones.

La figura 2-44 muestra varios tipos de interruptores mecánicos. La figura 2-45 ilustra la vista de la construcción de un interruptor de volquete típico.

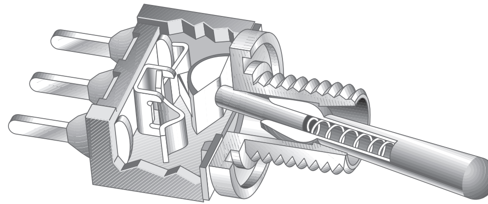


▲ **FIGURA 2–44**

Interruptores mecánicos típicos.

▶ FIGURA 2–45

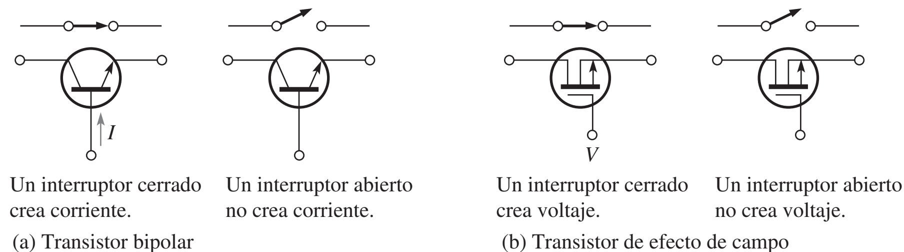
Vista de la construcción de un típico interruptor de volquete.



Interruptores de semiconductor Los transistores se utilizan ampliamente como interruptores en muchas aplicaciones. El transistor puede ser utilizado como el equivalente de un interruptor de vía y polo únicos. Se puede abrir o cerrar la trayectoria de un circuito controlando el estado del transistor. En la figura 2-46 se muestran dos tipos de símbolos de transistor junto con sus equivalentes de interruptor mecánico.

▶ FIGURA 2–46

Interruptores transistorizados.



He aquí una descripción de operación muy simplificada. Un tipo, llamado *transistor bipolar*, es controlado por medio de corriente. Cuando hay corriente en una terminal específica, el transistor actúa como interruptor cerrado; cuando no hay corriente en esa terminal, actúa como interruptor abierto, según ilustra la figura 2-46(a). Otro tipo, denominado *transistor de efecto de campo*, es controlado por voltaje. Cuando hay voltaje en una terminal específica, el transistor actúa como interruptor cerrado; cuando no hay voltaje en esa terminal, actúa como interruptor abierto, según indica la parte (b).

Dispositivos de protección Se utilizan **fusibles** y **cortacircuitos** para crear deliberadamente un circuito abierto cuando la corriente excede una cantidad específica de amperes a causa de un funcionamiento defectuoso u otra condición anormal presente en un circuito. Por ejemplo, un fusible o un cortacircuito de 20 A abrirán un circuito cuando la corriente exceda los 20 A.

La diferencia básica entre un fusible y un cortacircuito radica en que, cuando un fusible se "funde", debe ser reemplazado; pero cuando un cortacircuito se abre, puede ser repuesto o vuelto a utilizar repetidamente. Estos dos dispositivos protegen a un circuito contra daños causados por corriente excesiva o evitan una condición peligrosa creada por el sobrecalentamiento de alambres y otros componentes cuando la corriente es demasiada. En la figura 2-47 se muestran varios fusibles típicos, junto con sus símbolos esquemáticos.

Dos categorías básicas de fusibles, en función de su configuración física, son el tipo cartucho y el tipo tapón (atornillable). Los fusibles tipo cartucho vienen en varias configuraciones con puntas de conexión u otros tipos de contacto, como indica la figura 2-47(a). En la parte (b) se muestra un fusible tipo tapón típico. La operación del fusible está basada en la temperatura de fusión de un alambre u otro elemento metálico. Conforme la temperatura aumenta, el elemento fusible se va calentando y al sobrepasarse la corriente nominal el elemento alcanza su temperatura de fusión y se abre, cortando así la potencia del circuito.

Dos tipos comunes de fusibles son los de acción rápida y de acción lenta (fusión lenta). Los de acción rápida son tipo F y los de de acción lenta son tipo T. En operación normal, la mayoría de los fusibles se ven sometidos a sobrecorrientes intermitentes que sobrepasan la corriente nominal, tal como cuando se activa la potencia hacia un circuito. Con el tiempo, esto reduce la capacidad del fusible de soportar sobrecorrientes cortas o incluso corrientes de valor nominal. Un fusible de fusión lenta puede tolerar sobrecorrientes más intensas y de mayor duración que el fusible de acción rápida típico. En la figura 2-47(c) se muestra un símbolo de fusible.

En la figura 2-47(d) se muestran cortacircuitos típicos y el símbolo aparece en la parte (e). En general, un cortacircuito detecta la corriente excesiva por el efecto de calentamiento de la corrien-

(a) Fusibles de cartucho

(b) Fusible de tapón

(c) Símbolo de fusible

(d) Cortacircuitos

(e) Símbolo de cortacircuito

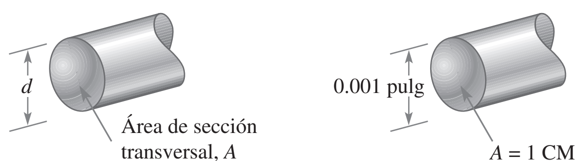
▲ **FIGURA 2–47**

Fusibles y cortacircuitos típicos y sus símbolos.

te o por el campo magnético que ésta crea. En un cortacircuito basado en el efecto de calentamiento, un resorte bimetálico abre los contactos cuando la corriente nominal es sobrepasada. Una vez abiertos, los contactos se mantienen así por medios mecánicos hasta que son manualmente repuestos. En un cortacircuito basado en un campo magnético, los contactos se abren a causa de una fuerza magnética suficiente creada por la corriente excesiva y deben ser repuestos mecánicamente.

Alambres

En aplicaciones eléctricas, los alambres son la forma más común de material conductor utilizado. Estos alambres varían en diámetro y son ordenados con arreglo a números de calibre estándar, llamados tamaños **AWG** (de American Wire Gauge). Conforme el número de calibre se incrementa, el diámetro del alambre disminuye. El tamaño de un alambre también se especifica en función de su área de sección transversal, como se ilustra en la figura 2-48. Una unidad de área de sección transversal utilizada para estos alambres es el **mil circular**, abreviado MC. Un mil circular es el área de un alambre con diámetro de 0.001 pulg (1 mil). Se puede encontrar el área



◀ **FIGURA 2–48**

Área de sección transversal de un alambre.

de sección transversal expresando el diámetro en milésimas de pulgada (mils) y elevándolo al cuadrado, como sigue:

Ecuación 2–5

$$A = d^2$$

donde A es el área de sección transversal en mils circulares y d es el diámetro en mils. La tabla 2-4 proporciona los tamaños AWG con su área de sección transversal correspondiente y la resistencia en ohms por cada 1000 pies (ft) a 20°C.

▼ **TABLA 2–4**

Tamaños American Wire Gauge (AWG) y resistencias de cobre sólido redondo.

AWG #	ÁREA (MC)	RESISTENCIA (Ω/1000 PIES A 20°C)	AWG #	ÁREA (MC)	RESISTENCIA (Ω/1000 PIES A 20°C)
0000	211,600	0.0490	19	1,288.1	8.051
000	167,810	0.0618	20	1,021.5	10.15
00	133,080	0.0780	21	810.10	12.80
0	105,530	0.0983	22	642.40	16.14
1	83,694	0.1240	23	509.45	20.36
2	66,373	0.1563	24	404.01	25.67
3	52,634	0.1970	25	320.40	32.37
4	41,742	0.2485	26	254.10	40.81
5	33,102	0.3133	27	201.50	51.47
6	26,250	0.3951	28	159.79	64.90
7	20,816	0.4982	29	126.72	81.83
8	16,509	0.6282	30	100.50	103.2
9	13,094	0.7921	31	79.70	130.1
10	10,381	0.9989	32	63.21	164.1
11	8,234.0	1.260	33	50.13	206.9
12	6,529.0	1.588	34	39.75	260.9
13	5,178.4	2.003	35	31.52	329.0
14	4,106.8	2.525	36	25.00	414.8
15	3,256.7	3.184	37	19.83	523.1
16	2,582.9	4.016	38	15.72	659.6
17	2,048.2	5.064	39	12.47	831.8
18	1,624.3	6.385	40	9.89	1049.0

EJEMPLO 2–7 ¿Cuál es el área de sección transversal de un alambre con diámetro de 0.005 pulgadas?

Solución

$$d = 0.005 \text{ pulg} = 5 \text{ mils}$$

$$A = d^2 = 5^2 = \mathbf{25\ CM}$$

Problema relacionado ¿Cuál es el área de sección transversal de un alambre de 0.0015 pulgadas de diámetro?

Resistencia de un alambre Aunque el alambre de cobre conduce electricidad extremadamente bien, sigue teniendo algo de resistencia, como todos los conductores. La resistencia de un alambre depende de tres características físicas: (a) tipo de material, (b) longitud del alambre, y (c) área de sección transversal. Además, la temperatura también puede afectar la resistencia.

Cada tipo de material conductor tiene una característica llamada *resistividad*, ρ. Para cada material, ρ es un valor constante a una temperatura dada. La fórmula para la resistencia de un alambre de longitud l y área de sección transversal A es

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

Ecuación 2–6

Esta fórmula muestra que la resistencia se incrementa con un aumento en la resistividad y la longitud, y que disminuye al aumentar su área de sección transversal. Para calcular la resistencia en ohms, la longitud debe estar en pies, el área de sección transversal en mils circulares, y la resistividad en MC-Ω/pie.

EJEMPLO 2–8 Encuentre la resistencia de un alambre de cobre de 100 pies de longitud y área de sección transversal igual a 810.1 MC. La resistividad del cobre es de 10.37 MC-Ω/pie.

Solución

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{(10.37 \text{ MC-}\Omega\text{/pies})(100 \text{ pies})}{810.1 \text{ M}C} = \mathbf{1.280\ \Omega}$$

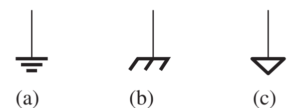
Problema relacionado Consulte la tabla 2-4 para determinar la resistencia de un alambre de cobre de 100 pies y área de sección transversal igual a 810.1 MC. Compare con el resultado ya calculado.

Como se mencionó, la tabla 2-4 enlista la resistencia de varios tamaños de alambre estándar en ohms por cada 1000 pies a 20°C. Por ejemplo, un tramo de 1000 pies de alambre de cobre calibre 14 tiene una resistencia de 2.525 Ω. Un tramo de 1000 pies de alambre calibre 22 tiene resistencia de 16.14 Ω. Para una longitud dada, el alambre más pequeño tiene más resistencia. Por tanto, para un voltaje dado, los alambres grandes pueden conducir más corriente que los más pequeños.

Tierra

En circuitos eléctricos, la **tierra** es el punto de referencia. El término *tierra* se originó a partir del hecho de que el conductor de un circuito normalmente se conectaba a un barra de metal de 8 pies de largo enterrada en el suelo. Hoy en día, este tipo de conexión se conoce como *tierra en tierra*. En instalaciones eléctricas domésticas, la tierra en tierra se indica mediante un alambre de color verde o de cobre desnudo. La tierra en tierra normalmente se conecta al chasis metálico de un aparato o a una caja metálica por seguridad. Desafortunadamente, ha habido excepciones a esta regla, las cuales pueden representar un riesgo de seguridad si un chasis metálico no es tierra en tierra. Es una buena idea confirmar que un chasis metálico en realidad se encuentre a un potencial de tierra en tierra antes de realizar cualquier trabajo en un instrumento o aparato.

Otro tipo de tierra se denomina *tierra de referencia*. Los voltajes siempre se especifican con respecto a otro punto. Si dicho punto no se establece explícitamente, se entiende que es la tierra de referencia. Tierra de referencia define 0 V para el circuito. La tierra de referencia puede estar a un potencial completamente diferente de la tierra en tierra. A la tierra de referencia también se le denomina **común**, y se le identifica mediante COM o COMM porque representa un conductor común. Cuando se está alambrando una tarjeta prototipo en el laboratorio, normalmente se reserva una de la tiras colectoras (una extensa línea a todo lo largo de la tarjeta) para este conductor común.



▲ **FIGURA 2–49**

Símbolos de tierra comúnmente utilizados.

En la figura 2-49 se muestran tres símbolos de tierra. Desafortunadamente, no existe otro símbolo para distinguir entre la tierra en tierra y la tierra de referencia. El símbolo ilustrado en (a) representa o una tierra en tierra o una tierra de referencia, (b) muestra una tierra en chasis, y (c) es un símbolo de referencia alterno utilizado normalmente cuando hay más de una conexión (tal como una tierra analógica y digital en el mismo circuito). En este libro se utilizará el símbolo mostrado en la parte (a).

Un instrumento tal como una fuente de potencia de laboratorio puede tener una terminal verde identificada como tierra en tierra. La figura 2-50 muestra una fuente de potencia de triple sa-

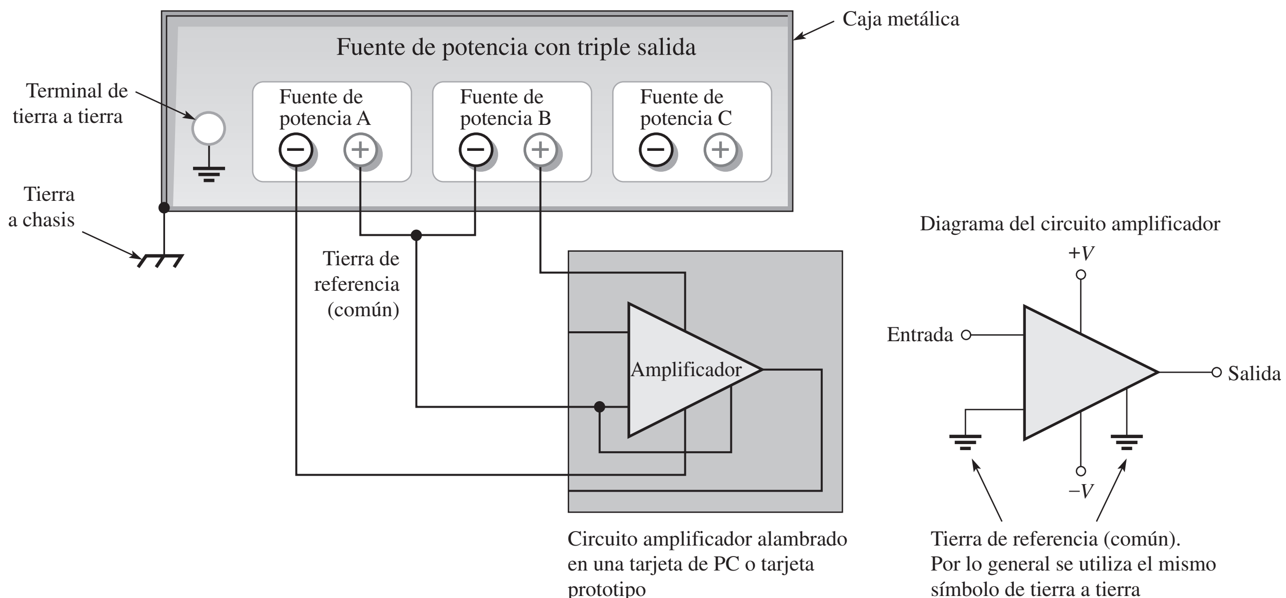
▶ **FIGURA 2–50**

Fuente de potencia con triple salida. (Cortesía de B+K Precision).



lida. Cada una de las fuentes de potencia presentes en el mismo chasis está aislada de la tierra en tierra. Cuando se requiere tierra en tierra, se saca una conexión a una tierra en tierra del frente del tablero mediante el conector verde localizado en el lado izquierdo. Internamente, la tierra en tierra se conecta a la punta central (redonda) presente en la clavija de ca.

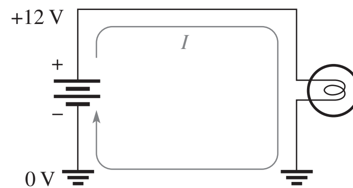
Si se desea conectar una fuente positiva a un circuito, no se utiliza la tierra en tierra, y la referencia de tierra (común) para el circuito es la terminal (–) de la fuente. Si se requiere un voltaje negativo, la terminal (+) es la referencia de tierra. Muchos circuitos requieren tanto fuentes positivas como negativas, por lo que en ese caso la terminal (+) de una fuente puede ser conectada a la terminal negativa de la otra fuente, la cual se convierte en referencia. La figura 2-51 ilustra este tipo de conexión. La tierra en tierra no se utiliza en esta aplicación. Advierta que para la tarjeta de circuito ejemplo, el circuito amplificador requiere de una conexión común entre dos puntos la cual se realiza en la tierra de referencia o común de la fuente de potencia. Tal como ilustra la figura, un dibujo esquemático puede indicar la referencia común mediante un símbolo o símbolos de tierra. Cuando en el diagrama de un circuito no aparece un símbolo de tierra, el punto común o referencia en general se supone que es o el lado negativo o el positivo de la fuente de voltaje, según la configuración del circuito.



▲ **FIGURA 2–51**

Fuente de potencia con triple salida. (Cortesía de B+K Precision).

La figura 2-52 ilustra un circuito simple con conexiones a tierra. La corriente sale de la terminal positiva de la fuente de 12 V, pasa por la lámpara, y regresa a la terminal negativa de la fuente a través de la conexión a tierra. La tierra proporciona una ruta para el regreso de la corriente a la fuente porque todos los puntos de tierra son eléctricamente el mismo punto. En la parte superior del circuito, el voltaje es de +12 V con respecto a tierra.



◀ **FIGURA 2–52**

Circuito muestra con conexiones a tierra.

REPASO DE LA SECCIÓN 2–6

1. ¿Cuáles son los elementos básicos de un circuito eléctrico?
2. ¿Qué es un circuito abierto?
3. ¿Qué es un circuito cerrado?
4. ¿Cuál es la diferencia entre un fusible y un cortacircuito?
5. ¿Cuál alambre es más grande en cuanto a diámetro, un AWG3 o un AWG 22?
6. ¿Qué es la tierra (común) en un circuito eléctrico?

2–7 MEDICIONES DE CIRCUITO BÁSICAS

Un técnico en electrónica no puede realizar su trabajo si no sabe cómo medir voltaje, corriente y resistencia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Realizar mediciones de circuito básicas**
  - Medir apropiadamente el voltaje en un circuito
  - Medir apropiadamente la corriente en un circuito
  - Medir apropiadamente la resistencia
  - Ajustar y leer medidores básicos

En el trabajo electrónico se requieren comúnmente mediciones de voltaje, corriente y resistencia. El instrumento utilizado para medir voltaje es un **voltímetro**, para medir corriente se usa un **amperímetro** y para la resistencia un **ohmmetro.** Estos tres instrumentos se combinan a menudo en un solo mecanismo llamado **multímetro**, en el cual se puede elegir qué cantidad específica se va a medir seleccionando la función apropiada mediante un interruptor.

Símbolos de medidores

A lo largo de todo este libro se utilizarán ciertos símbolos en circuitos para representar medidores, como indica la figura 2-53. Será posible encontrar cualquiera de cuatro tipos de símbolos para voltímetros, amperímetros y ohmmetros, según qué símbolo transmita con más efectividad la información requerida. El símbolo de medidor digital se utiliza cuando en un circuito se tienen que indicar valores específicos. El símbolo de medidor de gráfica de barras y en ocasiones el de



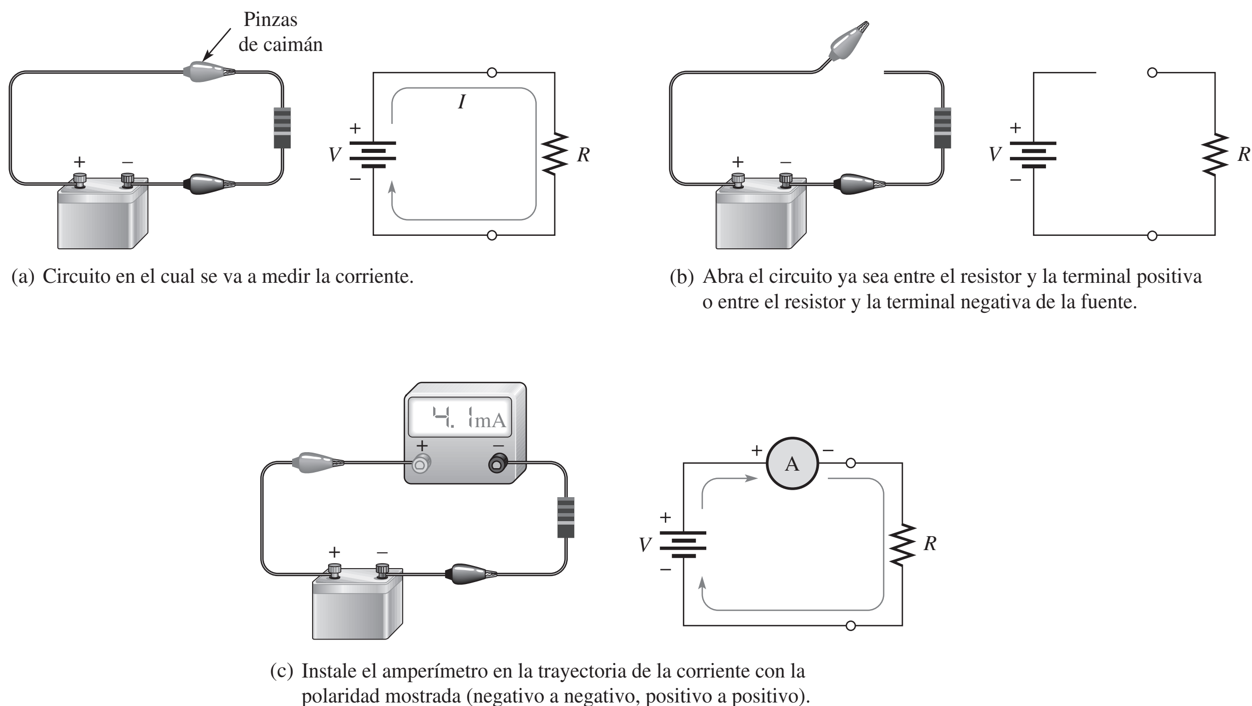
▲ **FIGURA 2–53**

Ejemplos de símbolos de medidor utilizados en este libro. Cada símbolo puede ser usado para representar ya sea un amperímetro (A), un voltímetro (V) o un ohmmetro (Ω).

medidor analógico se utilizan para ilustrar la operación de un circuito cuando mediciones *relativas* o cambios de cantidades, en lugar de valores específicos, tienen que ser descritos. Una cantidad cambiante puede indicarse mediante una flecha en pantalla que muestre un incremento o una disminución. Se utiliza el símbolo genérico para indicar la colocación de medidores en un circuito cuando no tiene que ser mostrado ningún valor o cambio de valor.

Medición de corriente

La figura 2-54 ilustra cómo medir corriente con un amperímetro. La parte (a) muestra un circuito simple en el cual la corriente que pasa por el resistor tiene que ser medida. Primero hay que asegurarse de que el ajuste del intervalo del amperímetro es mayor que la corriente esperada, y entonces se conecta el amperímetro en la trayectoria de la corriente abriendo primero el circuito, como indica la parte (b). Acto seguido se inserta el medidor en la forma que muestra la parte (c). Tal conexión es una conexión en serie. La polaridad del medidor debe ser tal que la corriente esté en la terminal positiva y salga por la terminal negativa.



▲ **FIGURA 2–54**

Ejemplo de conexión de un amperímetro en un circuito simple para medir corriente.

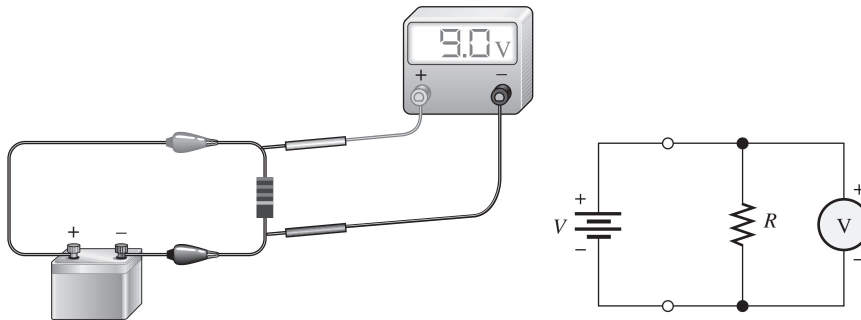
Medición de voltaje

Para medir voltaje, el voltímetro se conecta a través del componente para el cual el voltaje ha de ser medido. Tal conexión es una conexión en paralelo. La terminal negativa del medidor se co-

necta al lado negativo del circuito, y la terminal positiva se conecta al lado positivo del circuito. La figura 2-55 muestra un voltímetro conectado para medir el voltaje a través del resistor.

NOTA DE SEGURIDAD

Nunca porte anillos o cualquier tipo de joyería metálica mientras trabaje en un circuito. Estos artículos pueden entrar accidentalmente en contacto con el circuito y provocar un choque eléctrico y/o daño al circuito.

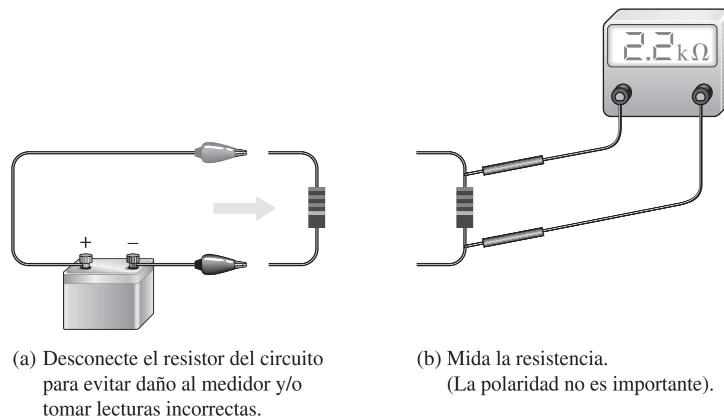


▲ FIGURA 2–55

Ejemplo de conexión de un voltímetro en un circuito simple para medir voltaje.

Medición de resistencia

Para medir la resistencia, primero se corta la energía eléctrica y se desconecta uno o ambos extremos del resistor del circuito; luego se conecta el ohmmetro a través del resistor. Este procedimiento se indica en la figura 2-56.



(a) Desconecte el resistor del circuito para evitar daño al medidor y/o tomar lecturas incorrectas.

(b) Mida la resistencia. (La polaridad no es importante).

◀ FIGURA 2–56

Ejemplo de cómo utilizar un ohmmetro para medir resistencia.

Multímetros digitales

Un multímetro digital (**DMM**, por sus siglas en inglés) es un instrumento electrónico que combina medidores para efectuar la medición de voltaje, corriente y resistencia. Los multímetros digitales son el tipo de instrumento de medición electrónico más utilizado. En general, los multímetros digitales incluyen más funciones, mejor precisión, mayor facilidad de lectura, y mayor confiabilidad que muchos medidores analógicos. No obstante, estos últimos tienen por lo menos una ventaja sobre los multímetros digitales. Pueden rastrear, en una cantidad medida, variaciones y tendencias a corto plazo, a lo cual muchos multímetros digitales responden con lentitud. La figura 2-57 muestra multímetros digitales típicos.

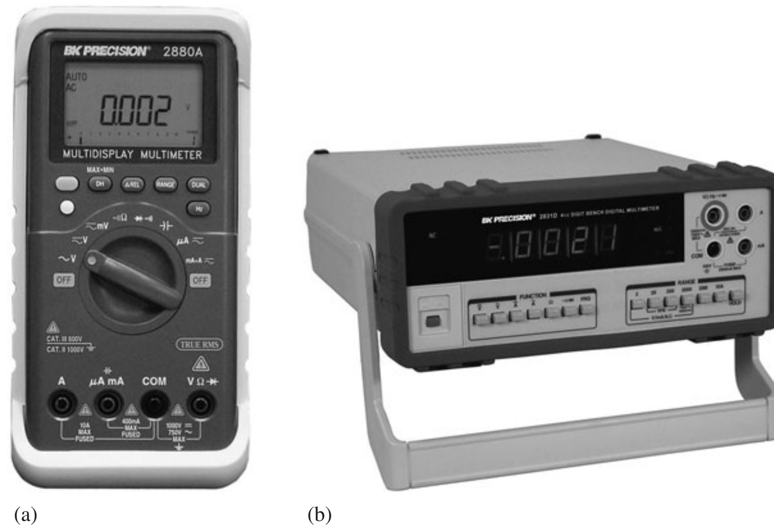
Funciones de un multímetro digital Las funciones básicas encontradas en la mayoría de los multímetros digitales incluyen lo siguiente:

- Ohms
- Voltaje y corriente directos
- Voltaje y corriente alternos

Algunos DMM ofrecen funciones especiales tales como pruebas de transistores y diodos, medición de potencia, y medición de decibeles para probar amplificadores de audio. Algunos medido-

▶ **FIGURA 2–57**

Multímetros digitales típicos. (Cortesía de B+K Precision.)



res requieren la selección manual de intervalos para ejecutar las funciones; pero muchos permiten seleccionar automáticamente dichos intervalos y se conocen como *autoselectores de intervalos*.

Pantallas de visualización de multímetro digital Los multímetros digitales están disponibles con pantallas de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés) o con pantallas provistas de un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés). La pantalla LCD es la más comúnmente utilizada en instrumentos de baterías porque requiere sólo de una muy pequeña cantidad de corriente. Un multímetro digital de batería con pantalla LCD opera con una batería de 9 V que durará desde unas cuantas horas hasta 2000 o más. La desventaja de las pantallas LCD es que (a) resultan difíciles o imposibles de leer en condiciones de baja luminosidad, y (b) responden con lentitud a cambios de medición. Las pantallas LED, por otra parte, pueden ser vistas en la oscuridad y responden con rapidez a cambios en los valores medidos. Las pantallas LED requieren mucha más corriente que las LCD y, por consiguiente, la duración de una batería se acorta cuando se les utiliza en equipo portátil.

Las pantallas LCD y LED de un multímetro digital vienen en formato de 7 segmentos. Cada dígito que aparece en pantalla se compone de siete segmentos distintos, tal como indica la figura 2-58(a). Cada uno de los diez dígitos decimales se forma por la activación de los segmentos apropiados, vea la figura 2-58(b). Además de los siete segmentos, también aparece un punto decimal.

▶ **FIGURA 2–58**

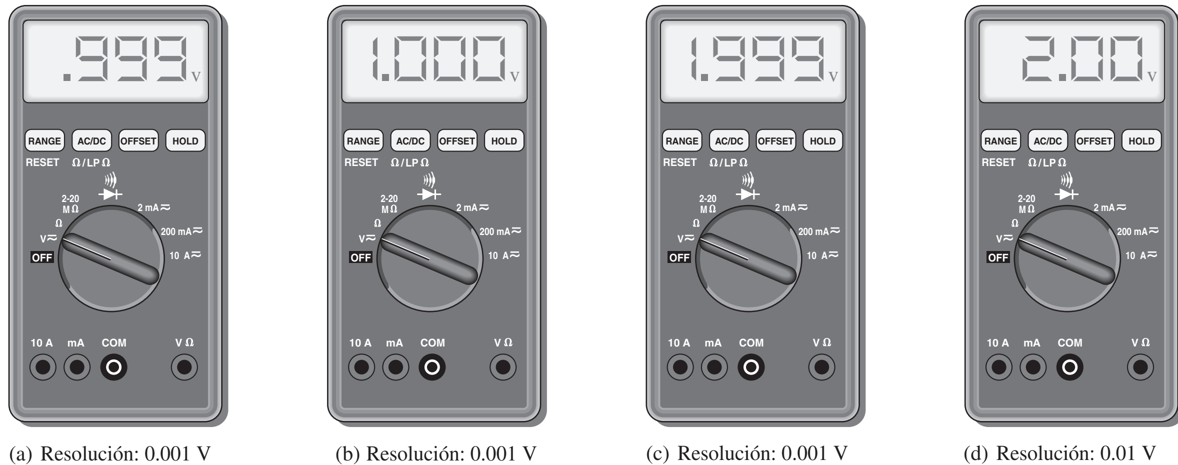
Pantalla de siete segmentos.



Resolución La **resolución** de un multímetro digital es el incremento más pequeño de una cantidad que el medidor puede medir. Mientras más pequeño es el incremento, mejor es la resolución. Un factor que determina la resolución de un medidor es el número de dígitos que aparecen en pantalla.

Ya que muchos multímetros digitales tienen 3½ dígitos en su pantalla, se utilizará este caso como ilustración. Un multímetro de 3½ dígitos tiene tres posiciones por dígito que pueden indicar desde 0 hasta 9, y una posición por dígito que puede indicar sólo un valor de 0 o 1. Este último dígito, conocido como *medio dígito*, es siempre el más importante en la pantalla. Por ejemplo, suponga que un multímetro digital lee 0.999 V, como indica la figura 2-59(a). Si el voltaje se incrementa en 0.001 V hasta 1 V, la pantalla muestra correctamente 1.000 V, según indica la parte (b). El "1" es el medio dígito. Por tanto, con 3½ dígitos, se puede observar una variación de 0.001 V, la cual es la resolución.

Ahora, suponga que el voltaje se incrementa hasta 1.999 V. Este valor se indica en el medidor tal como lo muestra la figura 2-59(c). Si el voltaje aumenta en 0.001 V hasta 2 V, el medio dígito no puede desplegar el "2", de modo que la pantalla muestra 2.00. El medio dígito desaparece y sólo quedan activos tres dígitos, como indica la parte (d). Con sólo tres dígitos activos, la reso-



(a) Resolución: 0.001 V (b) Resolución: 0.001 V (c) Resolución: 0.001 V (d) Resolución: 0.01 V

▲ **FIGURA 2–59**

Un multímetro digital de 3 1/2 dígitos ilustra cómo cambia la resolución con el número de dígitos en uso.

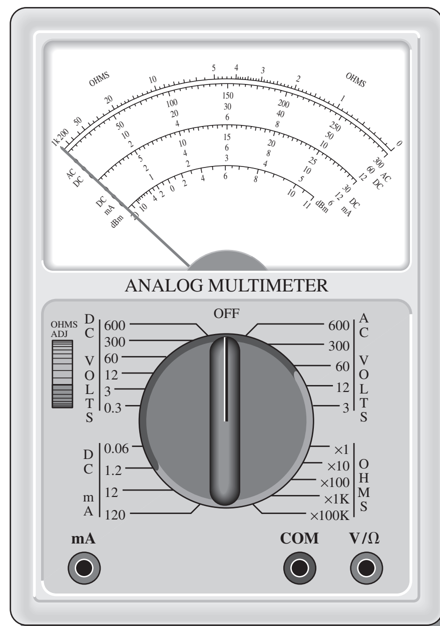
lución es de 0.01 V en lugar de 0.001 V como es el caso con 3½ dígitos activos. La resolución sigue siendo de 0.01 V hasta 19.99 V. La resolución se va a 0.1 V para lecturas de 20.0 V a 199.9 V. En 200 V, la resolución se va a 1 V, y así sucesivamente.

La capacidad de resolución de un multímetro digital también está determinada por la circuitería interna y la velocidad con que la cantidad medida se muestrea. También se encuentran disponibles multímetros digitales con capacidades de 4½ a 8½ dígitos.

Precisión La **precisión** es el grado al cual un valor medido representa el valor verdadero o aceptado de una cantidad. Su circuitería interna y la calibración determinan estrictamente la precisión de un multímetro digital. En multímetros típicos, las precisiones oscilan entre 0.01 y 0.5%, con algunos multímetros digitales de grado laboratorio cuya precisión llega hasta 0.002 por ciento.

Lectura de multímetros analógicos

Aunque el multímetro digital es el tipo predominante, es posible que de vez en cuando se tenga que utilizar un medidor analógico. En la figura 2-60 se muestra un multímetro analógico típico. Este instrumento en particular puede ser utilizado para medir tanto corriente directa (cd) como corriente alterna (ca), así como valores de resistencia. Este multímetro tiene cuatro funciones selec-



◀ **FIGURA 2–60**

Multímetro analógico típico.

cionables: volts de cd (DC VOLTS), miliamperes de cd (DC mA), volts de ca (AC VOLTS), y OHMS. La mayoría de los multímetros analógicos son similares al mostrado aquí.

Dentro de cada función existen varios intervalos, tal como se indica mediante los brazos que circundan el interruptor selector. Por ejemplo, la función DC VOLTS tiene intervalos de 0.3 V, 3 V, 12 V, 60 V, 300 V y 600 V. Por tanto, se pueden medir voltajes de cd desde la escala completa de 0.3 V hasta la escala completa de 600 V. Con la función DC mA, es posible medir corrientes directas desde la escala completa de 0.06 mA hasta la escala completa de 120 mA. En la escala de ohms, los ajustes son ×1, ×10, ×100, ×1000 y ×100,000.

La escala de ohms Los ohms se leen en la escala superior del medidor. Esta escala no es lineal; es decir, los valores representados por cada división (grande o pequeña) varían conforme se recorre la escala. En la figura 2-60, observe cómo la escala se comprime más a medida que se va de derecha a izquierda.

Para leer el valor real en ohms, multiplque el número señalado en la escala por la manecilla por el factor seleccionado con el interruptor. Por ejemplo, cuando el interruptor se coloca en ×100 y la manecilla está en 20, la lectura es de 20 × 100 = 2000 Ω.

Como otro ejemplo, suponga que el interruptor está en ×10 y la manecilla en la séptima división pequeña entre las marcas 1 y 2, por lo que la lectura es de 17 Ω (1.7 × 10). Ahora bien, si el medidor permanece conectado a la misma resistencia y la posición del interruptor se cambia a ×1, la manecilla se moverá a la segunda división pequeña entre las marcas 15 y 20. Esta, desde luego, también es una lectura de 17 Ω, lo cual ilustra que un valor de resistencia dada puede ser leído a menudo en más de una posición del interruptor de intervalo. Sin embargo, el medidor deberá ser *puesto en cero*, cada vez que se cambia el intervalo, juntando las puntas detectoras y ajustando la manecilla.

Las escalas AC-DC y DC mA Las escalas segunda, tercera y cuarta de arriba hacia abajo, marcadas “AC” y “DC”, se utilizan junto con las funciones DC VOLTS y AC VOLTS. La escala superior ac-dc termina en la marca de 300 y se usa con ajustes de intervalo, tales como 0.3, 3 y 300. Por ejemplo, cuando el interruptor está en 3 en la función DC VOLTS, la escala de 300 tiene un valor de escala completa de 3 V; en el ajuste de intervalo de 300, el valor de escala completa es de 300 V. La escala ac-dc intermedia termina en 60. Esta escala se utiliza junto con ajustes de intervalo, tales como 0.06, 60 y 600. Por ejemplo, cuando el interruptor está en 60 en la función DC VOLTS, el valor de escala completa es de 60 V. La escala ac-dc inferior termina en 12 y se utiliza junto con ajustes del interruptor, tales como 1.2, 12 y 120. Las tres escalas Dc mA se utilizan en la misma forma.

EJEMPLO 2–9

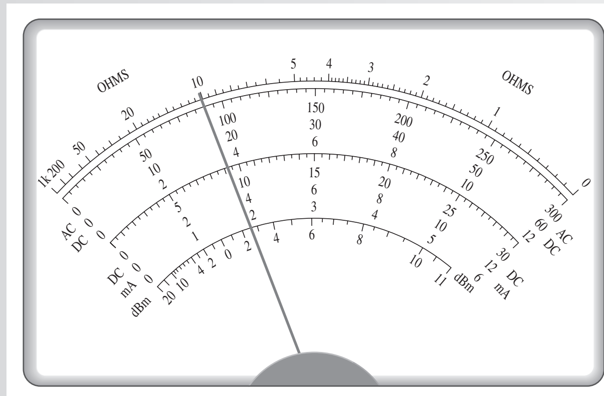
Determine la cantidad (voltaje, corriente y resistencia) que se está midiendo y su valor en cada posición del interruptor especificada en el medidor de la figura 2-61.

(a) El interruptor se sitúa en la función DC VOLTS y en el intervalo de 60 V.

(b) El interruptor se sitúa en la función DC mA y en el intervalo de 12 mA.

(c) El interruptor se sitúa en la función OHMS y en el intervalo ×1 K.

▶ **FIGURA 2–61**



Solución **(a)** La lectura tomada en la escala intermedia AC-DC es de **18 V.**

(b) La lectura tomada en la escala inferior AC-DC es de **3.8 mA.**

(c) La lectura tomada en la escala de ohms (superior) es de **10 kΩ.**

Problema relacionado En la figura 2-61 el interruptor se mueve a la posición ×100. Suponiendo que se mide la misma resistencia de la parte (c), ¿qué hará la manecilla?

REPASO DE LA SECCIÓN 2–7

1. Nombre los medidores utilizados para medir (a) corriente, (b) voltaje, y (c) resistencia.
2. Coloque dos amperímetros en el circuito de la figura 2-42 para medir la corriente que fluye por una u otra lámpara (asegúrese de observar las polaridades). ¿Cómo pueden ser realizadas las mismas mediciones con sólo un amperímetro?
3. Muestre cómo se coloca un voltímetro para medir el voltaje de la lámpara de la figura 2-42.
4. Mencione dos tipos comunes de pantallas de multímetro digital, y analice las ventajas y desventajas de cada tipo.
5. Defina la *resolución* de un multímetro digital.
6. El multímetro de la figura 2-60 se sitúa en el intervalo de 3 V para medir voltaje de cd. La manecilla está en 150 en la escala ac-dc superior. ¿Qué voltaje se está midiendo?
7. ¿Cómo se ajusta el medidor de la figura 2-60 para medir 275 V de cd, y en qué escala se lee el voltaje?
8. Si usted pretende medir una resistencia de más de 20 kΩ, ¿dónde coloca el interruptor?

2–8 SEGURIDAD ELÉCTRICA

La seguridad es un asunto del mayor interés cuando se trabaja con electricidad. La posibilidad de recibir un choque eléctrico o una quemadura siempre está presente, de modo que siempre se debe obrar con precaución. Usted se convierte en una trayectoria para la corriente cuando se aplica voltaje a través de dos puntos de su cuerpo, y la corriente produce choque eléctrico. Los componentes eléctricos a menudo operan a altas temperaturas, así que puede sufrir quemaduras en la piel cuando entra en contacto con ellos. Además, la presencia de electricidad crea un riesgo potencial de incendio.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Reconocer los riesgos eléctricos y practicar procedimientos de seguridad**
    - Describir la causa del choque eléctrico
    - Mencionar los grupos de trayectorias de corriente a través del cuerpo
    - Analizar los efectos de la corriente en el cuerpo humano
    - Mencionar las precauciones de seguridad que deberá observar cuando trabaje con electricidad

Choque eléctrico

La corriente que pasa a través del cuerpo, no el voltaje, es la causa del **choque eléctrico**. Desde luego, se requiere que un voltaje pase por una resistencia para producir corriente. Cuando un punto del cuerpo se pone en contacto con un voltaje y otro punto entra en contacto con un voltaje diferente o con tierra, tal como un chasis metálico, circulará corriente por el cuerpo de un punto al

otro. La trayectoria que tome la corriente dependerá de los puntos por los cuales ocurra el voltaje. La severidad del choque eléctrico resultante se relaciona con la cantidad de voltaje y con la trayectoria que tome la corriente a través del cuerpo. La trayectoria de la corriente determina qué tejidos y órganos serán afectados.

Efectos de la corriente en el cuerpo humano La cantidad de corriente depende del voltaje y de la resistencia. El cuerpo humano tiene una resistencia que depende de muchos factores, los cuales incluyen la masa corporal, la humedad de la piel, y los puntos del cuerpo que entran en contacto con un potencial de voltaje. La tabla 2-5 muestra los efectos de varios valores de corriente en miliamperes.

▶ **TABLA 2–5**

Efectos físicos de la corriente eléctrica. Los valores varían dependiendo de la masa corporal.

CORRIENTE (mA)	EFECTO FÍSICO
0.4	Sensación ligera
1.1	Umbral de percepción
1.8	Choque, sin dolor, sin pérdida de control muscular
9	Choque doloroso, sin pérdida de control muscular
16	Choque doloroso, traspaso del umbral
23	Choque doloroso severo, contracciones musculares, dificultad para respirar
75	Fibrilación ventricular, umbral
235	Fibrilación ventricular, generalmente fatal por duración de 5 o más segundos
4,000	Parálisis cardíaca (no hay fibrilación ventricular)
5,000	Calcinación de tejidos

Resistencia corporal La resistencia del cuerpo humano es típicamente de 10 a 50 kΩ y depende de los dos puntos entre los cuales se mida. La humedad de la piel también afecta la resistencia entre dos puntos. La resistencia determina la cantidad de voltaje requerido para producir cada uno de los efectos enumerados en la tabla 2-5. Por ejemplo, si usted tiene una resistencia de 10 kΩ entre dos puntos dados de su cuerpo, 90 V a través de esos puntos producirán suficiente corriente (9 mA) como para provocarle un choque doloroso.

Precauciones de seguridad

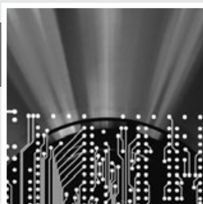
Existen muchas cosas prácticas que deben tomarse en cuenta cuando se trabaje con equipo eléctrico y electrónico. A continuación se enlistan algunas precauciones importantes.

- Evite el contacto con cualquier fuente de voltaje. Corte la corriente antes de trabajar con partes de un circuito que deban ser tocadas.
- No trabaje solo. Siempre deberá estar disponible un teléfono para urgencias.
- No trabaje cuando esté cansado o tomando medicamentos que le produzcan somnolencia.
- Quítese anillos, relojes y otra joyería metálica cuando trabaje en circuitos.
- No trabaje en un equipo hasta que conozca los procedimientos apropiados y esté consciente de peligros potenciales.
- Use equipo con cordones de corriente de tres hilos (clavija de tres puntas).
- Asegúrese de que los cordones de corriente estén en buenas condiciones y de que no falten o estén dobladas las puntas de conexión a tierra.
- Conserve sus herramientas en condiciones apropiadas. Asegúrese de que en los mangos de herramientas metálicas el aislante esté en buenas condiciones.
- Maneje las herramientas apropiadamente y mantenga limpia y ordenada el área de trabajo.
- Use gafas de seguridad cuando sea apropiado, en particular cuando suelde y pele cables.
- Siempre corte la energía y descargue capacitores antes de tocar cualquier parte de un circuito con sus manos.
- Conozca la ubicación del interruptor de emergencia y las salidas de emergencia.

- Nunca intente anular o modificar dispositivos de seguridad tales como un interruptor de intercierre (interlock).
- Siempre use zapatos y manténgalos secos. No se pare sobre pisos húmedos o metálicos.
- Nunca manipule instrumentos con las manos húmedas.
- Nunca asuma que un circuito está apagado. Verifíquelo dos veces con un medidor confiable antes de manipularlo.
- Ajuste el limitador en fuentes electrónicas de potencia para evitar corrientes más grandes de lo necesario para abastecer el circuito que esté probando.
- Algunos dispositivos, tales como los capacitores, pueden almacenar una carga letal durante largos periodos después de que se corta la energía. Deben ser descargados apropiadamente antes de trabajar con ellos.
- Cuando realice conexiones en circuito, siempre deje la conexión al punto con el voltaje más alto como último paso.
- Evite el contacto con las terminales de fuentes de potencia.
- Siempre use alambres con aislamiento y conectores o pinzas de contacto con fundas protectoras.
- Mantenga los cables y alambres tan cortos como sea posible. Conecte apropiadamente los componentes polarizados.
- Informe acerca de cualquier condición insegura.
- Entérese de las reglas del lugar de trabajo o laboratorio y sígalas en todo momento. No coloque bebidas o alimentos cerca de un equipo.
- Si otra persona no puede zafarse de un conductor energizado, corte la corriente de inmediato. Si esto no es posible, use cualquier material no conductor para tratar de apartar su cuerpo del contacto.

REPASO DE LA SECCIÓN 2–8

1. ¿Qué provoca dolor físico y/o daños al cuerpo cuando se hace contacto eléctrico?
2. Es correcto portar un anillo cuando se trabaja en un circuito eléctrico. (F o V)
3. Estar parado sobre un piso húmedo no presenta un riesgo de seguridad cuando se trabaja con electricidad. (F o V)
4. Un circuito puede ser realambrado sin cortar la corriente si se obra con cuidado. (F o V)
5. Un choque eléctrico puede ser extremadamente doloroso o incluso fatal. (F o V)

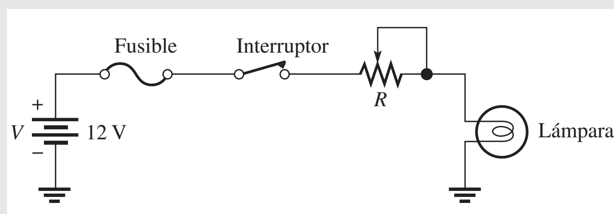


Una aplicación de circuito

En esta aplicación, a un circuito se le aplica un voltaje de cd para producir corriente en una lámpara y generar luz. Se verá cómo la corriente es controlada mediante resistencia. El circuito en el que se estará trabajando simula el circuito de iluminación del tablero de instrumentos de un automóvil, este circuito permite incrementar o disminuir la cantidad de luz sobre los instrumentos.

El circuito de iluminación del tablero de instrumentos de un automóvil opera con una batería de 12 V que es la fuente de voltaje para el circuito. Éste utiliza un potenciómetro conectado como reóstato, controlado mediante una perilla situada en el panel de instrumentos, el cual se usa para ajustar la cantidad de corriente que pasa por la lámpara para iluminar por detrás los instrumentos. La brillantez de la lámpara es proporcional a la cantidad de corriente que pasa por la lámpara. El interruptor utilizado para prenderla o apagarla es el mismo que se emplea para los faros delanteros. Hay un fusible para proteger el circuito en el caso de un cortocircuito.

La figura 2-62 muestra el diagrama del circuito de iluminación. La figura 2-63 muestra un circuito de ensayo que simula el circuito de iluminación con componentes que son funcionalmente equivalentes, pero no físicamente iguales, a los de un automóvil. Se utiliza una fuente de potencia de cd de laboratorio en vez de una batería de automóvil real. La tarjeta prototipo mostrada en la figura 2-63 es del tipo empleado comúnmente para construir circuitos en el banco de prueba.



▲ FIGURA 2–62

Diagrama del circuito básico de un tablero de iluminación.

El banco de prueba

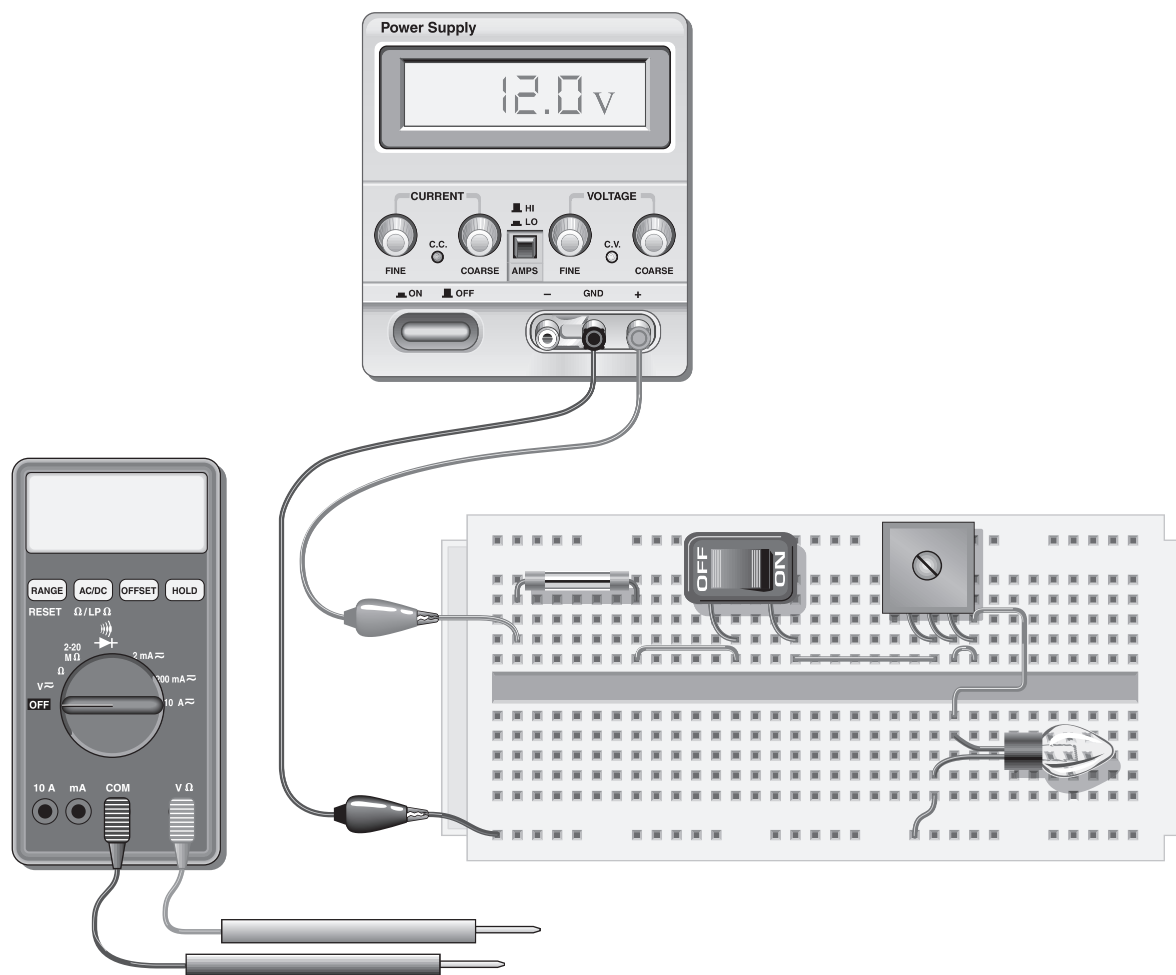
La figura 2-63 muestra el circuito de ensayo, una fuente de potencia de cd, y un multímetro digital. La fuente de potencia está conectada para proporcionar 12 V al circuito. El multímetro se utiliza para medir corriente, voltaje y resistencia en el circuito.

- Identifique cada componente del circuito, y revise el circuito de ensayo mostrado en la figura 2-63 para asegurarse de que está conectado como indica el diagrama de la figura 2-62.
- Explique el propósito de cada componente incluido en el circuito.

Tal como indica la figura 2-64, la tarjeta prototipo típica se compone de filas de pequeños receptáculos en los que se insertan alambres y cables. En esta configuración particular, los cinco receptáculos presentes en cada fila están conectados entre sí y están efectivamente en un punto eléctrico como se muestra en la vista posterior. Todos los receptáculos dispuestos en los bordes externos de la tarjeta generalmente están conectados entre sí como se muestra.

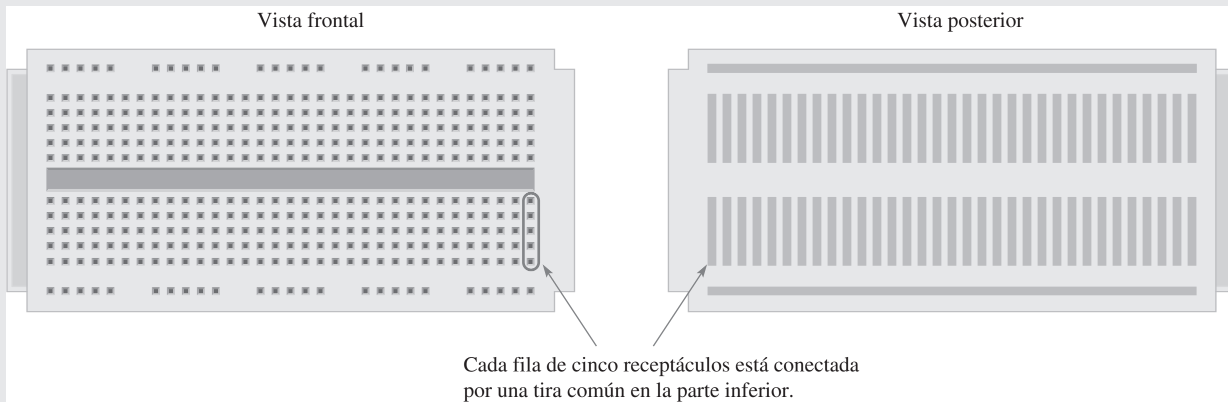
Medición de corriente con el multímetro

Disponga el multímetro en la función amperímetro para medir corriente. Debe abrir el circuito para conectar el amperímetro en serie y medir corriente. Consulte la figura 2-65.



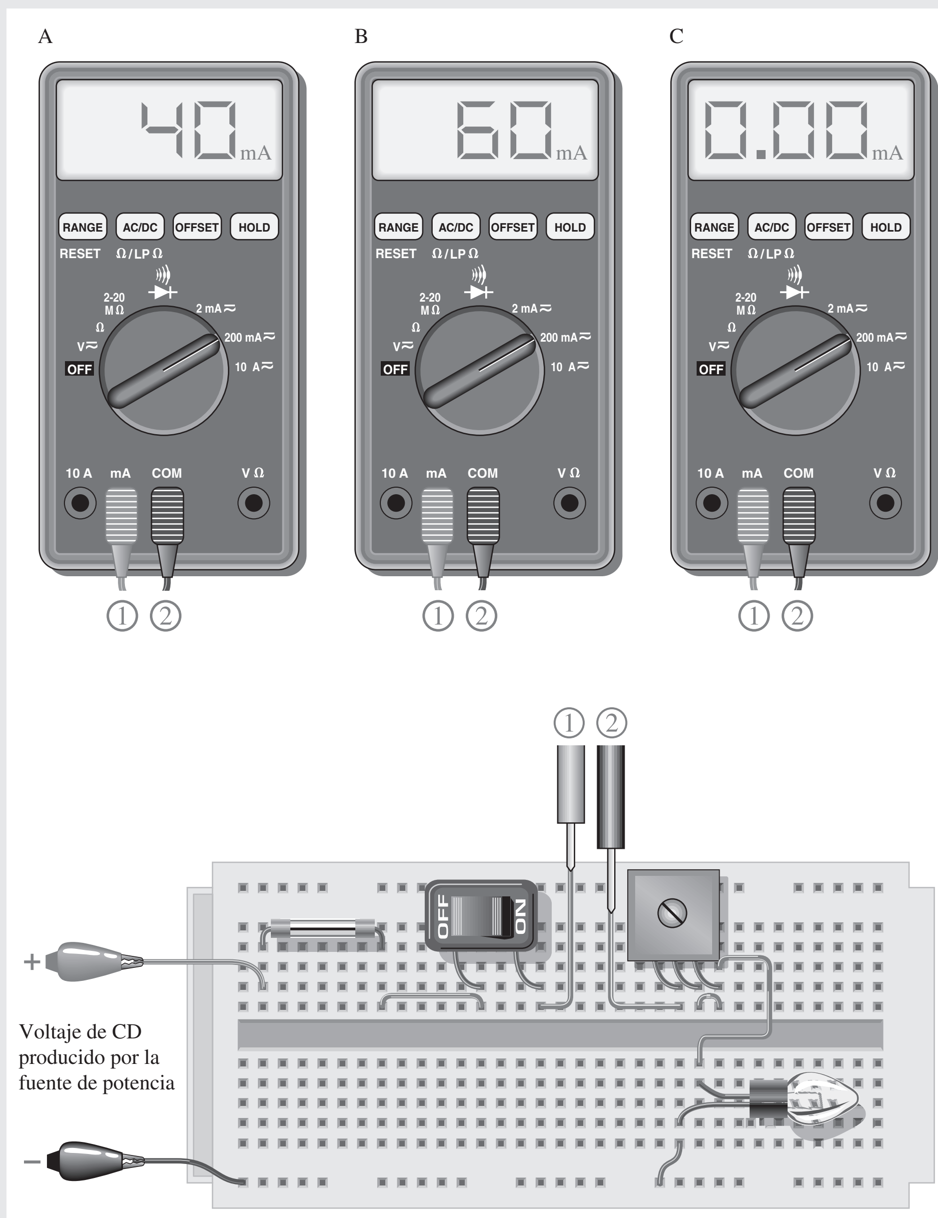
▲ FIGURA 2–63

Montaje en el banco de pruebas para simular el circuito de iluminación del tablero de instrumentos.



▲ **FIGURA 2–64**

Típica tarjeta prototipo utilizada para ensayar circuitos.



◀ **FIGURA 2–65**

Mediciones de corriente. Los números encerrados en círculos indican las conexiones medidor a circuito.

- Trace de nuevo el diagrama de la figura 2-62 para incluir el amperímetro.
- ¿Con cuál medición (A, B o C) brilla más la lámpara? Explique su respuesta.
- Mencione qué cambio o cambios pueden hacer que la lectura del amperímetro vaya de A a B.
- Mencione qué condición o condiciones del circuito harán que la lectura del amperímetro aparezca en C.

Medición de voltaje con el multímetro

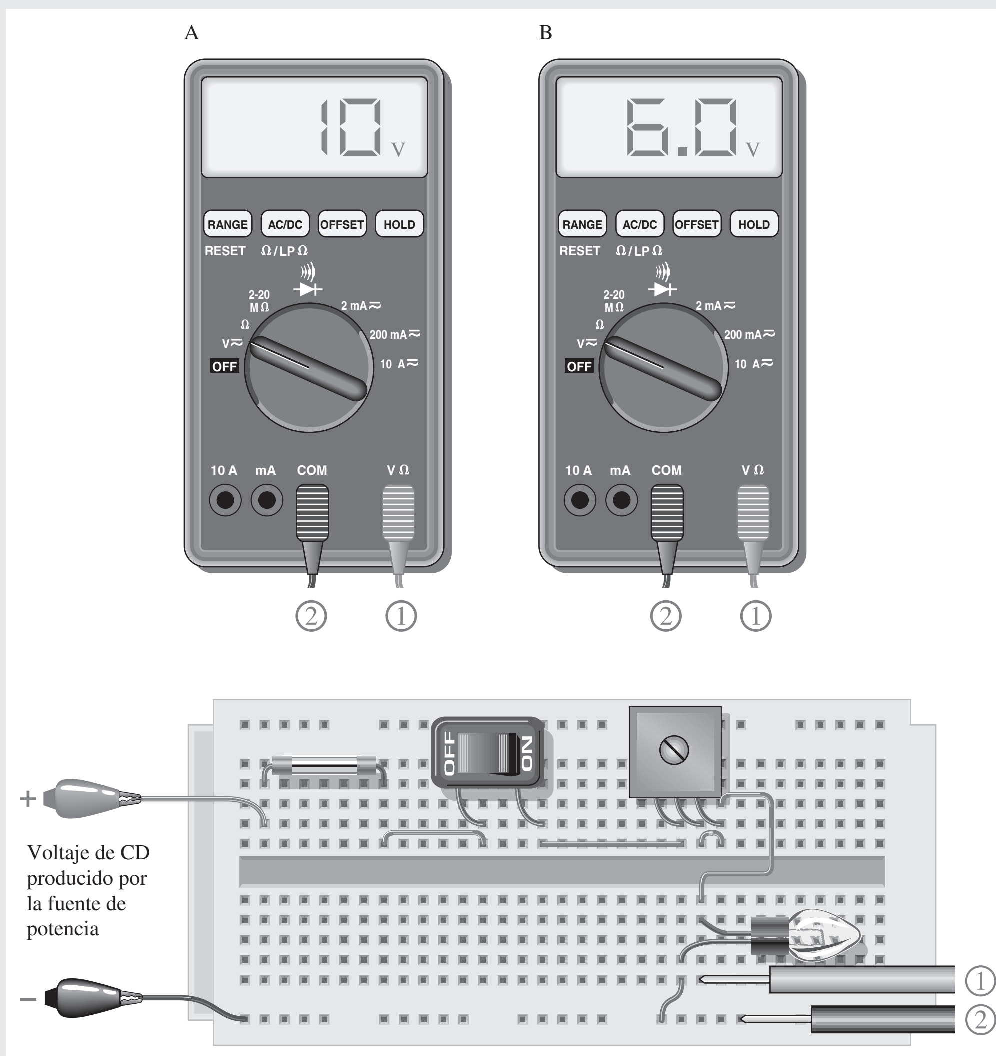
Disponga el multímetro en la función voltímetro para medir voltaje. Debe conectarlo a los dos puntos por los cuales se está midiendo el voltaje. Consulte la figura 2-66.

- ¿A través de qué componente se mide el voltaje?
- Trace de nuevo el diagrama de la figura 2-62 para incluir el voltímetro.
- ¿Con qué medición (A o B) brilla más la lámpara?
- Mencione qué cambio o cambios en el circuito pueden hacer que la lectura del voltaje vaya de A a B.

Medición de resistencia con el multímetro

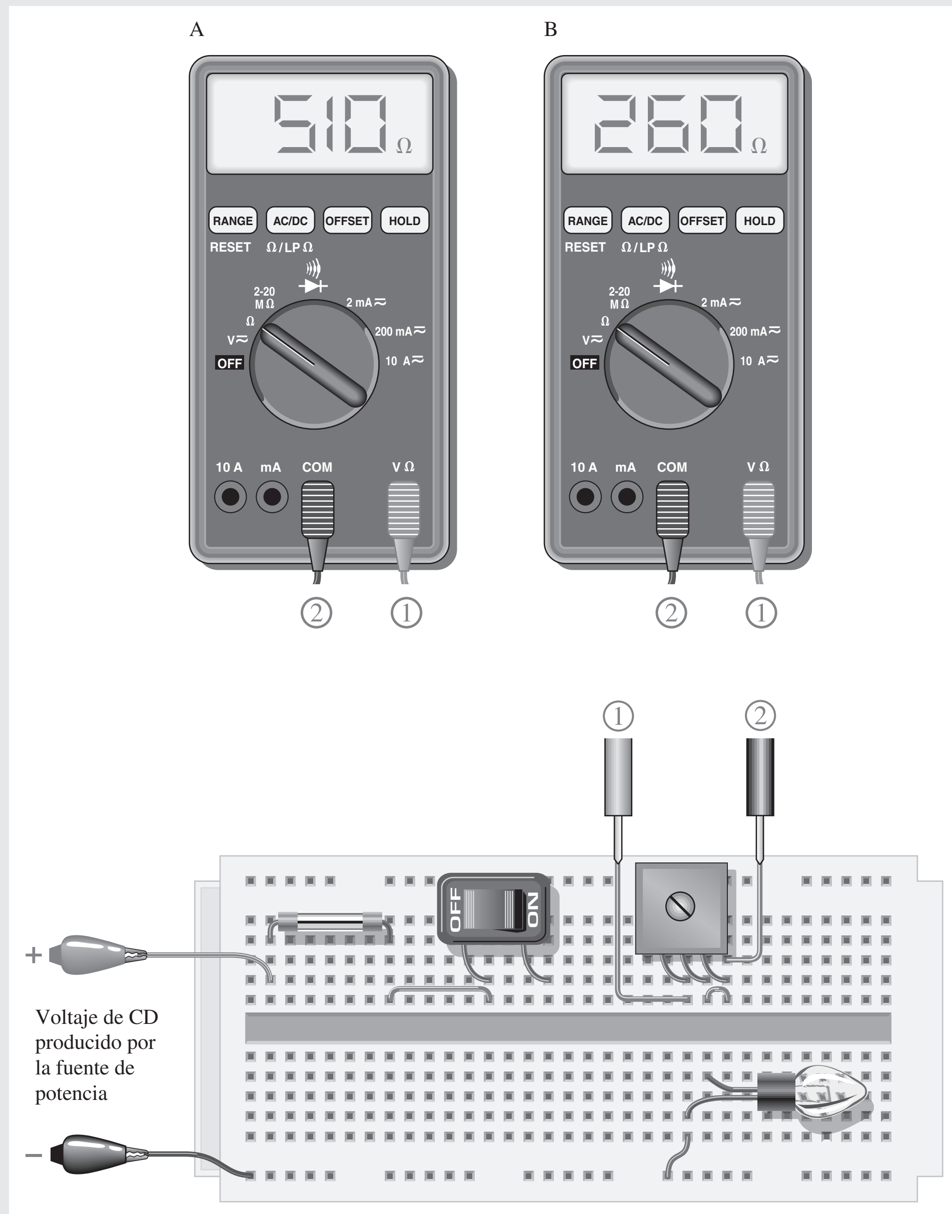
Disponga el multímetro en la función ohmmetro para medir resistencia. Antes de conectar el ohmmetro debe desconectar del circuito la resistencia que va a ser medida. Antes de que desconecte cualquier componente, primero corte la corriente. Consulte la figura 2-67.

- ¿Para qué componente se mide la resistencia?
- ¿Con qué medición (A o B) brillará más la lámpara cuando se reconecta el circuito y se restablece la corriente? Explique su respuesta.



▲ FIGURA 2–66

Mediciones de voltaje.



▲ **FIGURA 2–67**

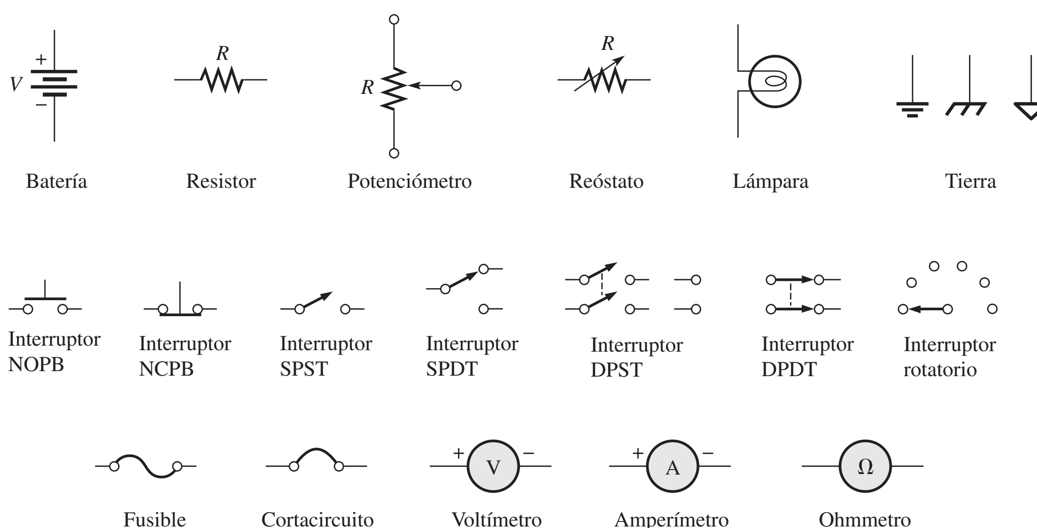
Mediciones de resistencia.

Repaso

1. Si el voltaje de suministro de cd aplicado al circuito de iluminación del tablero de instrumentos se reduce, ¿cómo se ve afectada la cantidad de luz producida por la lámpara? Explique su respuesta.
2. ¿Debe ajustarse el potenciómetro para una resistencia más alta o más baja de modo que el circuito produzca más luz?

RESUMEN

- Un átomo es la partícula más pequeña de un elemento que conserva las características de dicho elemento.
- Cuando los electrones presentes en la órbita externa de un átomo (electrones de valencia) se escapan, se convierten en electrones libres.
- Los electrones libres hacen posible la corriente.
- Las cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen.
- Se debe aplicar voltaje a un circuito para producir corriente.
- La resistencia limita la corriente.
- Básicamente, un circuito eléctrico se compone de una fuente, una carga, y una trayectoria para la carga.
- Un circuito abierto es un circuito donde la trayectoria de la corriente está interrumpida.
- Un circuito cerrado es un circuito que tiene una trayectoria completa para la corriente.
- Un amperímetro se conecta en línea con la trayectoria de la corriente.
- Un voltímetro se conecta en paralelo con la trayectoria de la corriente.
- Un ohmmetro se conecta en paralelo con un resistor (el resistor debe desconectarse del circuito).
- Un coulomb es la carga de 6.25×10^{18} electrones.
- Un volt es la diferencia de potencial (voltaje) entre dos puntos cuando se utiliza un joule para mover un coulomb de un punto a otro.
- Un ampere es la cantidad de corriente que existe cuando un coulomb de carga se mueve por una determinada área de sección transversal de un material en un segundo.
- Un ohm es la resistencia cuando existe un ampere de corriente en un material con un volt aplicado al material.
- La figura 2-68 muestra los símbolos eléctricos introducidos en este capítulo.



▲ FIGURA 2–68

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas que aparecen en este capítulo se definen en el glosario incluido al final del libro.

Aislante Material que no permite el paso de corriente en condiciones normales.

Ampere (A) Es la unidad de corriente eléctrica.

Átomo Partícula más pequeña de un elemento que posee las características únicas de dicho elemento.

Amperímetro Instrumento eléctrico utilizado para medir corriente.

AWG American Wire Gauge: estandarización basada en el diámetro de alambres.

Carga **1.** Es un elemento conectado a través de las terminales de salida de un circuito que absorbe corriente de la fuente y sobre el cual se realiza trabajo. **2.** Propiedad eléctrica de la materia que existe a causa de exceso o deficiencia de electrones. La carga puede ser positiva o negativa.

Circuito abierto Circuito en el cual no existe una trayectoria completa para la corriente.

Circuito cerrado Circuito con trayectoria completa para la corriente.

Circuito Interconexión de componentes eléctricos diseñada para producir un resultado deseado. Un circuito básico se compone de una fuente, una carga, y una trayectoria de interconexión para la corriente.

Conductancia Es la capacidad de un circuito de permitir el paso de la corriente. La unidad de medida es el siemens (S).

Conductor Material en el cual la corriente se establece con facilidad. Un ejemplo es el cobre.

Corriente Es la velocidad del flujo de la carga (electrones).

Coulomb **(C)** Es la unidad de carga eléctrica, la carga total poseída por 6.25×10^{18} electrones.

Choque eléctrico Sensación física que resulta del paso de corriente eléctrica por el cuerpo.

Electrón Es la partícula básica de carga eléctrica en la materia. El electrón posee carga negativa.

Electrón libre Electrón de valencia que se escapó de su átomo padre y está libre para moverse de átomo a átomo dentro de la estructura atómica de un material.

Fuente de corriente Dispositivo que produce una corriente constante con carga variable.

Fuente de voltaje Dispositivo que produce voltaje constante para una carga variable.

Multímetro digital (DMM, por sus siglas en inglés) Instrumento electrónico que combina medidores para medir voltaje, corriente y resistencia.

Ohm (Ω) Es la unidad de medición para resistencia.

Ohmmetro Instrumento para medir resistencia.

Potenciómetro Resistor variable de tres terminales.

Reóstato Es un resistor variable de dos terminales.

Resistencia Oposición a la corriente. La unidad de medición es el ohm (Ω).

Resistor Componente eléctrico diseñado específicamente para poseer cierta cantidad de resistencia.

Semiconductor Material que tiene un valor de conductancia ubicado entre el de un conductor y un aislante. El silicio y el germanio son ejemplos.

Siemens (S) Unidad de medición para conductancia.

Tierra En un circuito, es el punto común o de referencia.

Volt Es la unidad de voltaje o fuerza electromotriz.

Voltaje Es la cantidad de energía por carga disponible para mover electrones de un punto a otro en un circuito eléctrico.

Voltímetro Instrumento utilizado para medir voltaje.

FÓRMULAS

2–1	$Q = \dfrac{\text{número de electrones}}{6.25 \times 10^{18}\ \text{electrones/C}}$	Carga.
2–2	$V = \dfrac{W}{Q}$	El voltaje es igual a la energía dividida entre la carga.
2–3	$I = \dfrac{Q}{t}$	La corriente es igual a la carga dividida entre el tiempo.
2–4	$G = \dfrac{1}{R}$	La conductancia es el recíproco de la resistencia.
2–5	$A = d^2$	El área de sección transversal es igual al diámetro al cuadrado.
2–6	$R = \dfrac{\rho l}{A}$	La resistencia es la resistividad por la longitud dividida entre el área de sección transversal.

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Un átomo neutro con número atómico de tres, ¿cuántos electrones tiene?
(a) 1 **(b)** 3 **(c)** ninguno **(d)** depende del tipo de átomo

2. Las órbitas de los electrones se llaman
(a) capas **(b)** núcleos **(c)** ondas **(d)** valencias

3. Los materiales donde no hay corriente cuando se aplica voltaje se llaman
(a) filtros **(b)** conductores **(c)** aislantes **(d)** semiconductores

4. Cuando se colocan cerca uno del otro, un material positivamente cargado y uno negativamente cargado se
(a) repelen **(b)** vuelven neutros **(c)** atraen **(d)** intercambian cargas

5. La carga en un solo electrón es de
(a) 6.25×10^{-18} C **(b)** 1.6×10^{-19} C **(c)** 1.6×10^{-19} J **(d)** 3.14×10^{-6} C

6. *Diferencia de potencial* es otro término para
(a) energía **(b)** voltaje **(c)** la distancia de un electrón al núcleo **(d)** carga

7. La unidad de energía es el
(a) watt **(b)** coulomb **(c)** joule **(d)** volt

8. ¿Cuál de los siguientes artefactos no es un tipo de fuente de energía?
(a) batería **(b)** celda solar **(c)** generador **(d)** potenciómetro

9. ¿Cuál de las siguientes circunstancias no es condición de un circuito eléctrico?
(a) voltaje y sin corriente **(b)** corriente y sin voltaje
(c) voltaje y corriente **(d)** sin voltaje y sin corriente

10. La corriente eléctrica se define como
(a) electrones libres
(b) la velocidad del flujo de los electrones libres
(c) la energía requerida para mover electrones
(d) la carga en electrones libres

11. No hay corriente en un circuito cuando
(a) un interruptor está cerrado **(b)** un interruptor está abierto **(c)** no hay voltaje
(d) respuestas (a) y (c) **(e)** respuestas (b) y (c)

12. El propósito primordial de un resistor es
(a) incrementar la corriente **(b)** limitar la corriente
(c) producir calor **(d)** resistir el cambio de la corriente

13. Potenciómetros y reóstatos son tipos de
(a) fuentes de voltaje **(b)** resistores variables
(c) resistores fijos **(d)** cortacircuitos

14. En un circuito dado, la corriente no debe exceder de 22 A. ¿Qué valor de fusible es mejor?
(a) 10 A **(b)** 25 A **(c)** 20 A **(d)** no se requiere fusible

PROBLEMAS

Un asterisco (*) indica los problemas más difíciles. Las respuestas a los problemas de número impar se proporcionan al final del libro.

SECCIÓN 2–2 Carga eléctrica

1. ¿Cuál es la carga en coulombs del núcleo de un átomo de cobre?

2. ¿Cuál es la carga en coulombs del núcleo de un átomo de cloro?

3. ¿Cuántos coulombs de carga poseen 50×10^{31} electrones?

4. ¿Cuántos electrones se requieren para producir 80 μC (microcoulombs) de carga?

SECCIÓN 2–3 Voltaje, corriente y resistencia

5. Determine el voltaje en cada uno de los siguientes casos:

(a) 10 J/C **(b)** 5 J/2 C **(c)** 100 J/25 C

6. Se utilizan quinientos joules de energía para mover 100 C de carga por un resistor. ¿Cuál es el voltaje a través del resistor?

7. ¿Cuál es el voltaje de una batería que utiliza 800 J de energía para mover 40 C de carga a través de un resistor?

8. ¿Cuánta energía utiliza una batería de 12 V para mover 2.5 C por un circuito?

9. Si un resistor con una corriente de 2 A a través de él convierte 1000 J de energía eléctrica en energía calorífica en 15 s, ¿cuál es el voltaje a través del resistor?

10. Determine la corriente en cada uno de los siguientes casos:

(a) 75 C en 1 s **(b)** 10 C en 0.5 s **(c)** 5 C en 2 s

11. Seis décimos de coulomb pasan por un punto en 3 s. ¿Cuál es la corriente en amperes?

12. ¿Cuánto tiempo requieren 10 C para fluir más allá de un punto si la corriente es de 5 A?

13. ¿Cuántos coulombs pasan por un punto en 0.1 s cuando la corriente es de 1.5 A?

14. 5.74×10^{17} electrones fluyen por un alambre en 250 ms. ¿Cuál es la corriente en amperes?

15. Determine la conductancia para cada uno de los siguientes valores de resistencia:

(a) 5 Ω **(b)** 25 Ω **(c)** 100 Ω

16. Encuentre la resistencia correspondiente a las siguientes conductancias:

(a) 0.1 S **(b)** 0.5 S **(c)** 0.02 S

SECCIÓN 2–4 Fuentes de voltaje y de corriente

17. Enliste cuatro fuentes de voltaje comunes.

18. ¿En qué principio se basan los generadores eléctricos?

19. ¿Cómo difiere una fuente electrónica de potencia de las demás fuentes de voltaje?

20. Cierta fuente de corriente proporciona 100 mA a 1 kΩ de carga. Si la resistencia disminuye a 500 Ω, ¿cuál es la corriente en la carga?

SECCIÓN 2–5 Resistores

21. Determine los valores de resistencia y tolerancia para los siguientes resistores de 4 bandas

(a) rojo, violeta, naranja, oro **(b)** café, gris, rojo, plata

22. Encuentre las resistencias mínima y máxima dentro de los límites de tolerancia para cada resistor del problema 21.

23. Determine las bandas de color para cada uno de los siguientes valores de 4 bandas y 5% de tolerancia: 330 Ω, 2.2 kΩ, 56 kΩ, 100 kΩ y 39 kΩ.

24. Determine la resistencia y la tolerancia de cada uno de los siguientes resistores de 4 bandas:

(a) café, negro, negro, oro

(b) verde, café, verde, plata

(c) azul, gris, negro, oro

25. Determine las bandas de color para cada uno de los siguientes resistores de 4 bandas. Asuma que cada resistor tiene una tolerancia del 5 por ciento.

(a) 0.47 Ω **(b)** 270 kΩ **(c)** 5.1 MΩ

26. Determine la resistencia y la tolerancia de cada uno de los siguientes resistores de 5 bandas:

(a) rojo, gris, violeta, rojo, café

(b) azul, negro, amarillo, oro, café

(c) blanco, naranja, café, café, café

27. Determine las bandas de color para cada uno de los siguientes resistores de 5 bandas. Asuma que cada resistor tiene tolerancia del 1 por ciento.

(a) 14.7 kΩ **(b)** 39.2 Ω **(c)** 9.76 kΩ

28. El contacto ajustable de un potenciómetro lineal se coloca en el centro mecánico de su ajuste. Si la resistencia total es de 1000 Ω, ¿cuál es la resistencia entre cada terminal y el contacto ajustable?

29. ¿Cuál es la resistencia indicada por 4K7?

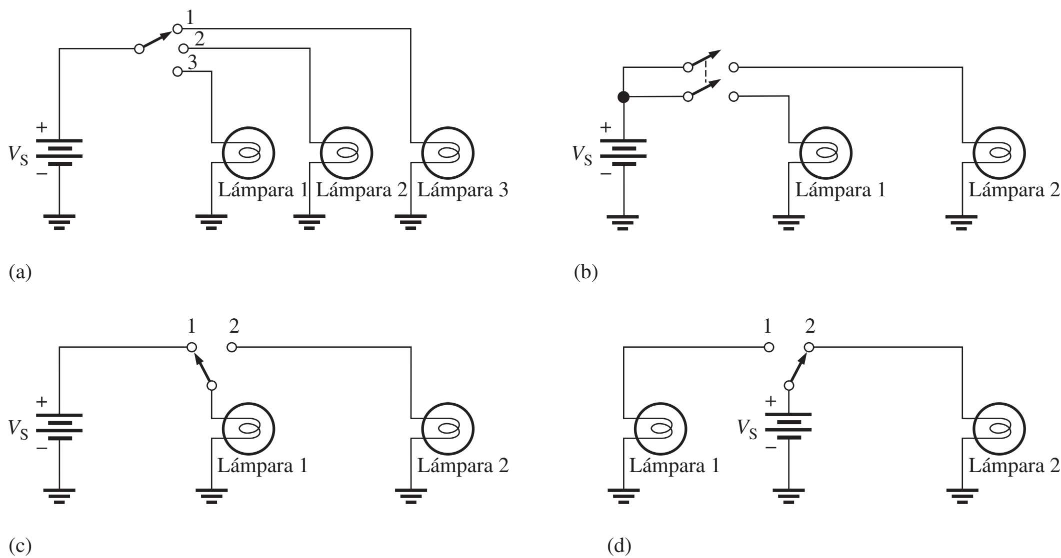
30. Determine la resistencia y la tolerancia de cada resistor rotulado como sigue:

(a) 4R7J **(b)** 5602M **(c)** 1501F

SECCIÓN 2–6 El circuito eléctrico

31. Trace la trayectoria de la corriente en la figura 2-69(a) con el interruptor en la posición 2.

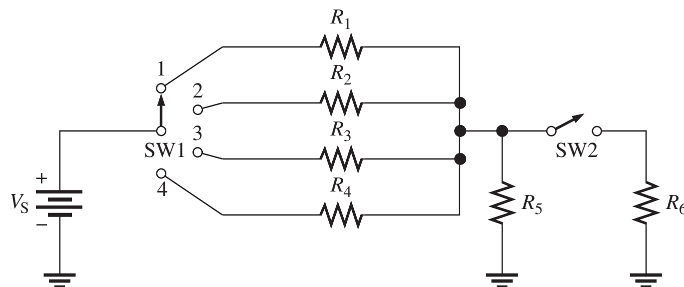
32. Con el interruptor en una u otra posición, trace de nuevo el circuito de la figura 2-69(d) con un fusible conectado para proteger el circuito contra corriente excesiva.



▲ **FIGURA 2–69**

33. En la figura 2-69, solamente hay un circuito en el cual es posible encender todas las lámparas al mismo tiempo. Determine cuál es este circuito.

34. ¿A través de que resistor de la figura 2-70 siempre hay corriente, sin importar la posición de los interruptores?



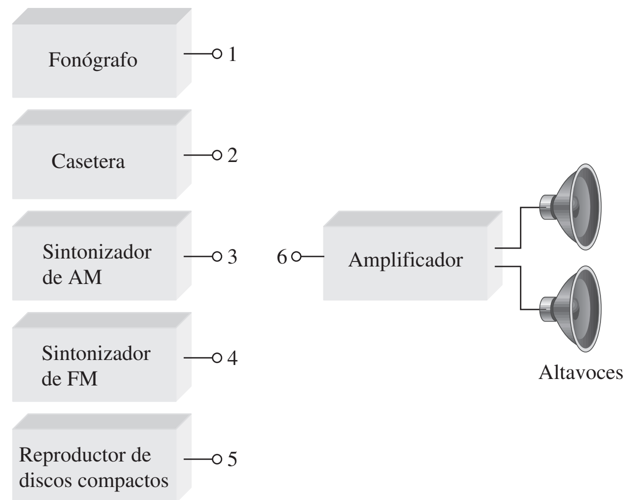
▲ **FIGURA 2–70**

*35. Disponga un arreglo de interruptor mediante el cual se puedan conectar dos fuentes de voltaje (V_{S1} y V_{S2}) al mismo tiempo a cualquiera de dos resistores (R_1 y R_2) como sigue:

V_{S1} conectada a R_1 y V_{S2} conectada a R_2

o V_{S1} conectada a R_2 y V_{S2} conectada a R_1

36. Las diferentes secciones de un sistema estereofónico están representadas por los bloques que aparecen en la figura 2-71. Muestre cómo se puede utilizar un solo interruptor para conectar el fonógrafo, el reproductor de discos compactos, la casetera, el sintonizador de AM, o el sintonizador de FM al amplificador mediante una sola perilla de control. En un momento dado, solamente una sección puede ser conectada al amplificador.

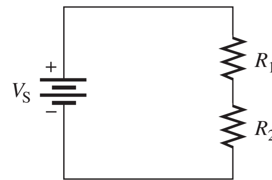


▲ FIGURA 2–71

SECCIÓN 2–7 Mediciones de circuito básicas

37. Muestre la colocación de un amperímetro y un voltímetro para medir la corriente y el voltaje de fuente en la figura 2-72.

▶ FIGURA 2–72

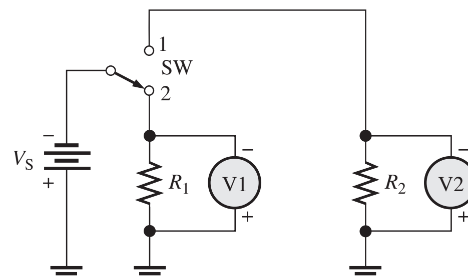


38. Explique cómo mediría la resistencia de R_2 en la figura 2-72.

39. En la figura 2-73, ¿cuánto voltaje indica cada medidor cuando el interruptor está en la posición 1? ¿En la posición 2?

40. En la figura 2-73, indique cómo se conecta un amperímetro para medir la corriente que sale de la fuente de voltaje sin importar la posición del interruptor.

▶ FIGURA 2–73

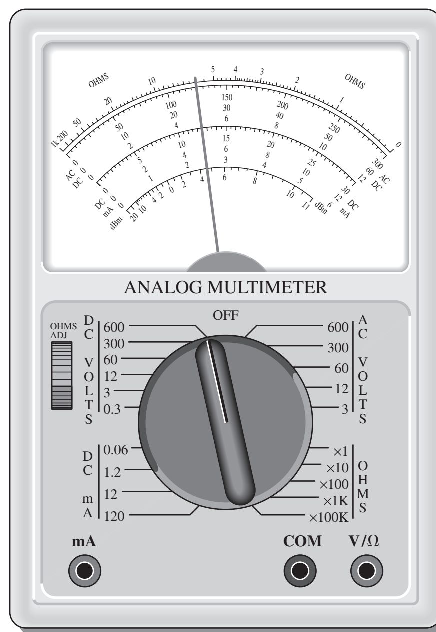


41. En la figura 2-70, muestre la colocación apropiada de los amperímetros para medir la corriente a través del resistor y la que sale de la batería.

42. Muestre la colocación apropiada de los voltímetros para medir el voltaje a través de cada resistor presente en la figura 2-70.

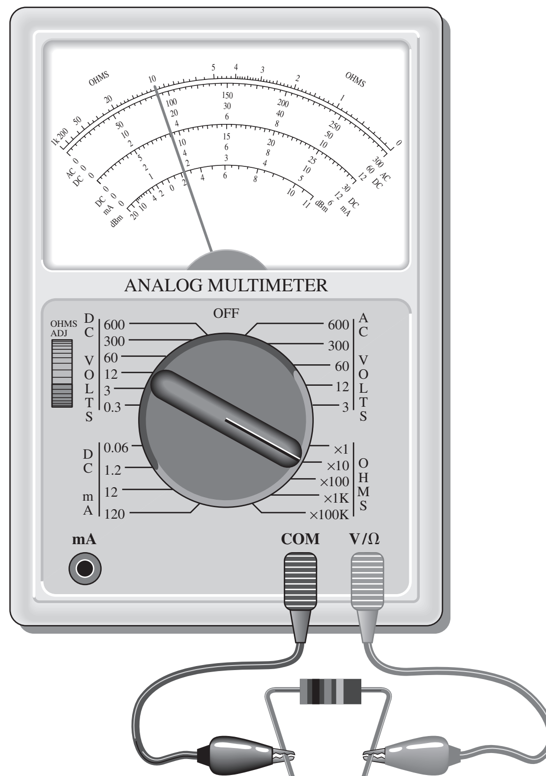
43. ¿Cuál es la lectura de voltaje del medidor mostrado en la figura 2-74?

▶ **FIGURA 2–74**



44. ¿Cuánta resistencia está midiendo el ohmmetro de la figura 2-75?

▶ **FIGURA 2–75**



45. Determine la resistencia indicada por cada una de las siguientes lecturas y ajustes de intervalo de ohmmetro:

(a) manecilla en 2, ajuste de intervalo en ×10

(b) manecilla en 15, ajuste de intervalo en ×100,000

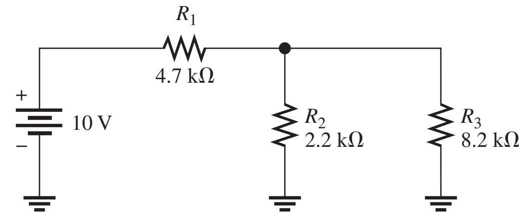
(c) manecilla en 45, ajuste de intervalo en ×100

46. ¿Cuál es la resolución máxima de un multímetro digital de 4 1/2 dígitos?

47. Indique en qué forma conectaría el multímetro de la figura 2-75 al circuito de la figura 2-76 para medir cada una de las siguientes cantidades. Incluya la función y el intervalo apropiados en todos los casos.

(a) I_1 **(b)** V_1 **(c)** R_1

▶ FIGURA 2–76



RESPUESTAS

REPASO DE SECCIÓN

SECCIÓN 2–1 Estructura atómica

1. El electrón es la partícula básica de la carga negativa.

2. Un átomo es la partícula más pequeña de un elemento que conserva las características únicas del elemento.

3. Un átomo es un núcleo cargado positivamente y circundado por electrones que lo orbitan.

4. El número atómico es el número de protones presentes en el núcleo.

5. No, cada elemento tiene un tipo diferente de átomo.

6. Un electrón libre es un electrón localizado en la capa externa y que ha escapado del átomo padre.

7. Las capas son bandas de energía en las que los electrones orbitan el núcleo de un átomo.

8. Cobre y plata

SECCIÓN 2–2 Carga eléctrica

1. Q = carga

2. La unidad de carga es el coulomb: C

3. La carga positiva o negativa es provocada por la pérdida o adquisición, respectivamente, de un electrón de capa externa (de valencia).

4. $Q = \dfrac{10 \times 10^{12}\text{ electrones}}{6.25 \times 10^{18}\text{ electrones/C}} = 1.6 \times 10^{-6}\text{ C} = 1.6\ \mu\text{C}$

SECCIÓN 2–3 Voltaje, corriente y resistencia

1. El voltaje es energía por unidad de carga.

2. El volt es la unidad de voltaje.

3. $V = W/Q = 24\text{ J}/10\text{ C} = 2.4\text{ V}$

4. La corriente es la velocidad del flujo de los electrones; su unidad es el ampere (A).

5. electrones/coulomb = 6.25×10^{18}

6. $I = Q/t = 20\text{ C}/4\text{ s} = 5\text{ A}$

7. La resistencia es la oposición a la corriente.

8. La unidad de resistencia es el ohm (Ω).

9. Existe un ohm cuando 1 V produce 1 A.

SECCIÓN 2–4 Fuentes de voltaje y de corriente

1. Una fuente de voltaje es un dispositivo que produce un voltaje constante para una carga variable.

2. Una batería convierte energía química en energía eléctrica.

3. Una celda solar utiliza el efecto fotovoltaico para convertir energía luminosa en energía eléctrica.

4. Un generador produce voltaje haciendo girar un conductor a través de un campo magnético basado en el principio de inducción electromagnética.

5. Una fuente electrónica de potencia convierte el voltaje de ca disponible comercialmente en voltaje de cd.

6. Una fuente de corriente es un dispositivo que produce una corriente constante para una carga variable.

7. Transistor

SECCIÓN 2–5 Resistores

1. Dos categorías de resistores son: fijos y variables. El valor de un resistor fijo no puede ser cambiado, pero el de un resistor variable sí.

2. *Primera banda*: primer dígito de valor de resistencia. *Segunda banda*: segundo dígito de valor de resistencia. *Tercera banda*: multiplicador (número de ceros después del segundo dígito). *Cuarta banda*: porcentaje de tolerancia.

3. **(a)** 27 kΩ ± 10% **(b)** 100 Ω ± 10%
(c) 5.6 MΩ ± 5% **(d)** 6.8 kΩ ± 10%
(e) 33 Ω ± 10% **(f)** 47 kΩ ± 5%

4. 330 Ω: (b); 2.2 kΩ: (d); 56 kΩ: (e); 100 kΩ: (f); 39 kΩ: (a)

5. **(a)** 33R = 33 Ω **(b)** 5K6 = 5.6 kΩ
(c) 900 = 900 Ω **(d)** 6M8 = 6.8 MΩ

6. Un reóstato tiene dos terminales; un potenciómetro tiene tres.

7. Un termistor es un resistor sensible a la temperatura.

SECCIÓN 2–6 El circuito eléctrico

1. Un circuito eléctrico se compone de una fuente, una carga, y una trayectoria para la corriente que fluye entre la fuente y la carga.

2. Un circuito abierto es uno que no tiene trayectoria para la corriente.

3. Un circuito cerrado es uno con trayectoria completa para la corriente.

4. Un fusible no puede volver a establecerse, un cortacircuito sí.

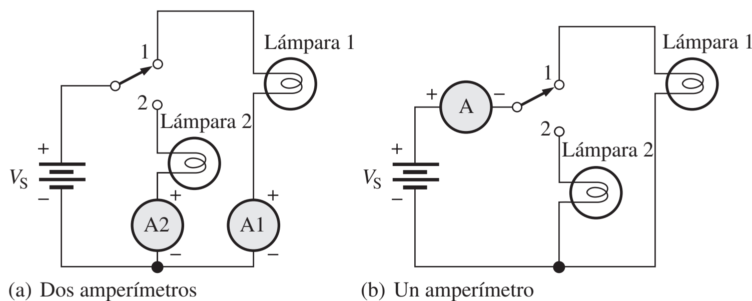
5. AWG 3 es más grande.

6. La tierra es el punto común o de referencia.

SECCIÓN 2–7 Mediciones de circuito básicas

1. **(a)** Un amperímetro mide corriente.
(b) Un voltímetro mide voltaje.
(c) Un ohmmetro mide resistencia.

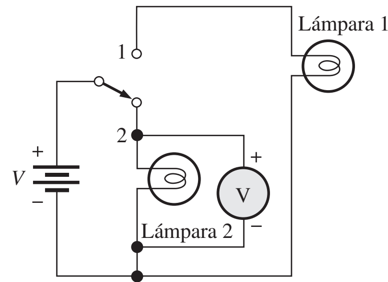
2. Vea la figura 2-77.



▲ **FIGURA 2–77**

3. Vea la figura 2-78.

▶ **FIGURA 2–78**



4. Dos tipos de pantalla de multímetro digital son la de cristal líquido (LCD) y la de diodo emisor de luz (LED). La LCD requiere poca corriente, pero es difícil de ver en situaciones de luz escasa y es lenta para responder. La pantalla LED puede ser vista en la oscuridad y responde con rapidez; sin embargo, requiere mucho más corriente que la LCD.

5. La resolución es el incremento más pequeño de una cantidad que el medidor puede medir.

6. 1.5 V

7. Coloque el interruptor de intervalo en 300 y lea en la escala ac-dc superior.

8. intervalo $\times$1000

SECCIÓN 2–8 Seguridad eléctrica

1. Corriente

2. F

3. F

4. F

5. T

Una aplicación del circuito

1. Menos voltaje produce menos luz porque se reduce la corriente.

2. Una menor resistencia producirá más luz.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

2–1 1.88 10^{19} electrones

2–2 600 J

2–3 12 C

2–4 4700 Ω ± 5%

2–5 47.5 Ω ± 2%

2–6 1.25 kΩ

2–7 2.25 CM

2–8 1.280 Ω; igual al resultado ya calculado

2–9 La manecilla se moverá hacia la izquierda hasta la marca “100”.

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (a) **3.** (c) **4.** (c) **5.** (b) **6.** (b) **7.** (c) **8.** (d)
9. (b) **10.** (b) **11.** (e) **12.** (b) **13.** (b) **14.** (c)

3 LEY DE OHM

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Explicar la ley de Ohm
- Calcular la corriente en un circuito
- Calcular el voltaje en un circuito
- Calcular la resistencia en un circuito
- Describir una aproximación básica a la localización de fallas

TÉRMINOS CLAVE

- Ley de Ohm
- Lineal
- Localización de fallas

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En esta aplicación se verá cómo utilizar la ley de Ohm en un circuito práctico. Se asignará la tarea de modificar un dispositivo de prueba existente para usarlo en una aplicación nueva. El dispositivo de prueba es una caja de resistencias con un arreglo de resistores seleccionables por conmutación de diversos valores. Se determinarán y especificarán los cambios necesarios en el circuito existente para la nueva aplicación. También, se desarrollará un procedimiento de prueba una vez que las modificaciones hayan sido hechas.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 2 se estudiaron los conceptos de voltaje, corriente y resistencia. También fue introducido el circuito eléctrico básico. En este capítulo usted aprenderá cómo el voltaje, la corriente y la resistencia están interrelacionados. También aprenderá a analizar un circuito eléctrico simple.

La ley de Ohm es tal vez la herramienta única más importante para el análisis de circuitos eléctricos y usted *debe* saber cómo aplicarla.

En 1826 Georg Simon Ohm encontró que la corriente, el voltaje y la resistencia están relacionados de una forma específica y predecible. Ohm expresó esta relación con una fórmula que hoy en día se conoce como ley de Ohm. En este capítulo, usted aprenderá la ley de Ohm y cómo utilizarla para resolver problemas de circuito. También se introduce un método general para abordar la localización de fallas que consiste en analizar, planificar y medir (APM, por sus siglas en inglés).

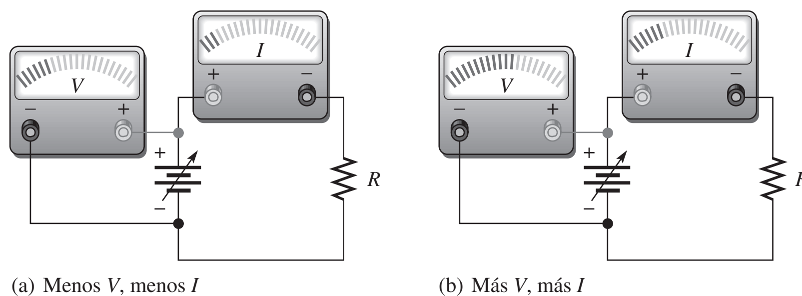
3–1 LA RELACIÓN DE CORRIENTE, VOLTAJE Y RESISTENCIA

La ley de Ohm describe matemáticamente la relación entre voltaje, corriente y resistencia en un circuito. La ley de Ohm se expresa en tres formas equivalentes según qué cantidad se requiera determinar. Como se verá, la corriente y el voltaje son linealmente proporcionales. Sin embargo, la corriente y la resistencia son inversamente proporcionales.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar la ley de Ohm**
  - Describir la relación entre *V*, *I* y *R*
  - Expresar *I* como una función de *V* y *R*
  - Expresar *V* como una función de *I* y *R*
  - Expresar *R* como una función de *V* e *I*
  - Demostrar gráficamente que *I* y *V* son directamente proporcionales
  - Demostrar gráficamente que *I* y *R* son inversamente proporcionales
  - Explicar por qué *I* y *V* son linealmente proporcionales

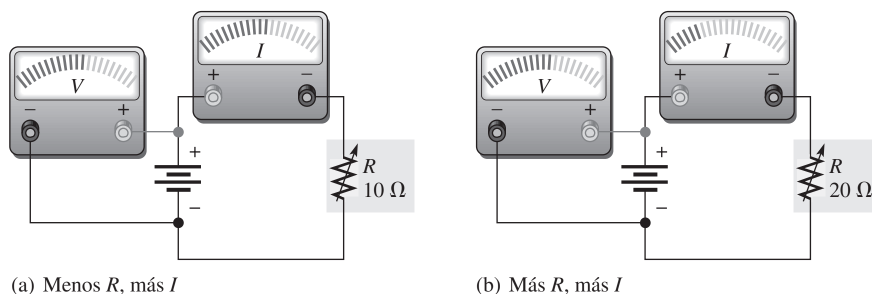
Ohm determinó experimentalmente que si el voltaje a través de un resistor se incrementa, la corriente a través del resistor también lo hará; y, asimismo, si el voltaje disminuye, la corriente hará lo mismo. Por ejemplo, si el voltaje se duplica, la corriente se duplicará. Si el voltaje se reduce a la mitad, la corriente lo hará también. Esta relación se ilustra en la figura 3-1, con indicaciones de medidor relativas de voltaje y corriente.



◀ **FIGURA 3–1**

Efecto en la corriente por el cambio de voltaje con la resistencia a un valor constante.

Ohm también determinó que si el voltaje se mantiene constante, menos resistencia produce más corriente, y, además, más resistencia produce menos corriente. Por ejemplo, si la resistencia se reduce a la mitad, la corriente se duplica. Si la resistencia se duplica, la corriente se reduce a la mitad. Este concepto se ilustra mediante las indicaciones de medidor presentes en la figura 3-2, donde la resistencia se incrementa y el voltaje se mantiene constante.



◀ **FIGURA 3–2**

Efecto en la corriente por el cambio de resistencia con el voltaje a un valor constante.

La **ley de Ohm** establece que la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia. Los circuitos mostrados en las figuras 3-1 y 3-2 ilustran la ley de Ohm, dada por la fórmula siguiente:

Ecuación 3–1

$$I = \frac{V}{R}$$

donde: I = corriente en amperes (A)
V = voltaje en volts (V)
R = resistencia en ohms (Ω)

Con un valor constante de R, si el valor de V se incrementa, el valor de I se incrementa; si V disminuye, I disminuye. Si V se mantiene constante y R se incrementa, I disminuye. Asimismo, si V se mantiene constante y R disminuye, I se incrementa

Con la ecuación 3-1, se puede calcular la corriente cuando se conocen los valores de voltaje y resistencia. Manipulando la ecuación 3-1, se puede obtener una expresión para voltaje y resistencia.

Ecuación 3–2

$$V = IR$$

Ecuación 3–3

$$R = \frac{V}{I}$$

Con la ecuación 3-2, se puede calcular el voltaje cuando se conocen los valores de corriente y resistencia. Con la ecuación 3-3, se puede calcular la resistencia si se conocen los valores de voltaje y corriente.

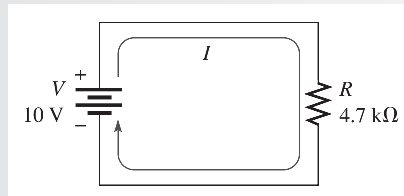
Las tres expresiones —ecuaciones 3-1, 3-2 y 3-3— son equivalentes. Simplemente son tres formas de utilizar la ley de Ohm.

La relación lineal de corriente y voltaje

En circuitos resistivos, la corriente y el voltaje son linealmente proporcionales. **Lineal** significa que si una de las cantidades se incrementa o disminuye en cierto porcentaje, la otra se incrementará o disminuirá en el mismo porcentaje, suponiendo que el valor de la resistencia es constante. Por ejemplo, si el voltaje a través de un resistor se triplica, la corriente se triplicará.

EJEMPLO 3–1 Demuestre que si el voltaje presente en el circuito de la figura 3-3 se incrementa a tres veces su valor presente, la corriente triplicará su valor.

▶ FIGURA 3–3



Solución Con 10 V, la corriente es

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10\text{ V}}{4.7\text{ k}\Omega} = \mathbf{2.13\text{ mA}}$$

Si el voltaje se incrementa a 30 V, la corriente será

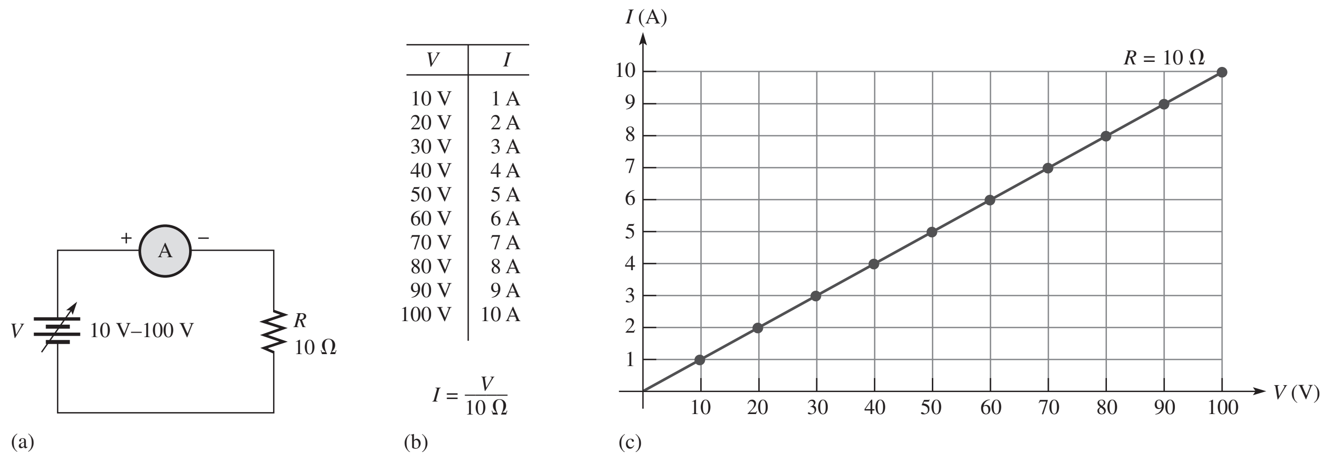
$$I = \frac{V}{R} = \frac{30\text{ V}}{4.7\text{ k}\Omega} = \mathbf{6.38\text{ mA}}$$

La corriente se fue de 2.13 mA a 6.38 mA cuando el voltaje se triplicó a 30 V.

Problema relacionado* Si el voltaje mostrado en la figura 3-3 se cuadruplica, ¿también lo hará la corriente?

*La respuesta se encuentra al final del capítulo.

Considere un valor constante de resistencia, por ejemplo, 10 Ω, y determine la corriente con varios valores de voltaje que van desde 10 V hasta 100 V en el circuito de la figura 3-4(a). Los valores de corriente obtenidos aparecen en la figura 3-4(b). La gráfica de los valores *I* frente a los valores *V* se muestra en la figura 3-4(c). Advierta que es una gráfica de línea recta. Esta gráfica indica que un cambio en voltaje produce un cambio linealmente proporcional de la corriente. No importa cuál sea el valor de *R*, suponiendo que *R* es constante, la gráfica de *I* frente a *V* siempre será una línea recta.



▲ **FIGURA 3–4**

Gráfica de corriente contra voltaje para el circuito de la parte (a).

EJEMPLO 3–2 Suponga que se está midiendo la corriente en un circuito que opera con 25 V. El amperímetro lee 50 mA. Más tarde, se observa que la corriente ha decaído a 40 mA. Suponiendo que la resistencia no cambió, se debe concluir que la fuente de voltaje ha cambiado. ¿Cuánto ha cambiado el voltaje y cuál es su nuevo valor?

Solución La corriente se ha reducido de 50 mA a 40 mA, lo cual es una reducción del 20%. Como el voltaje es linealmente proporcional a la corriente, el voltaje ha disminuido en el mismo porcentaje que la corriente. Al tomar el 20% de 25 V, se obtiene

$$\text{Cambio de voltaje} = (0.2)(25\text{ V}) = \mathbf{5\text{ V}}$$

Reste este cambio al voltaje original para obtener el nuevo voltaje.

$$\text{Nuevo voltaje} = 25\text{ V} - 5\text{ V} = \mathbf{20\text{ V}}$$

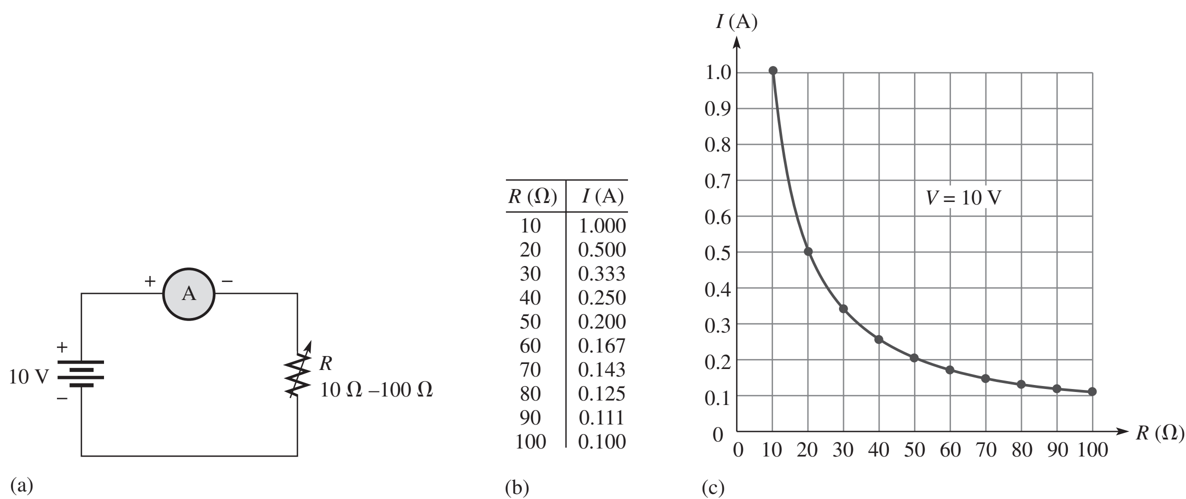
Observe que no se necesitó el valor de resistencia para encontrar el nuevo voltaje.

Problema relacionado Si la corriente se reduce a 0 A en las mismas condiciones establecidas en el ejemplo, ¿cuál es el voltaje?

La relación inversa de corriente y resistencia

Como se ha visto, la corriente varía inversamente con la resistencia tal como lo expresa la ley de Ohm, $I = V/R$. Cuando la resistencia se reduce, la corriente se incrementa; cuando la resistencia se incrementa, la corriente se reduce. Por ejemplo, si el voltaje de la fuente se mantiene constante y la resistencia se reduce a la mitad, la corriente se duplica; cuando la resistencia se duplica, la corriente se reduce a la mitad.

Considere un valor constante de voltaje, por ejemplo, 10 V, y determine la corriente con varios valores de resistencia que van desde 10 Ω hasta 100 Ω en el circuito de la figura 3-5(a). Los valores obtenidos se muestran en la figura 3-5(b). La gráfica de los valores *I* contra los valores *R* aparece en la figura 3-5(c).



R (Ω)	*I* (A)
10	1.000
20	0.500
30	0.333
40	0.250
50	0.200
60	0.167
70	0.143
80	0.125
90	0.111
100	0.100

(b)

▲ **FIGURA 3–5**

Gráfica de corriente contra resistencia para el circuito de la parte (a).

REPASO DE LA SECCIÓN 3-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo

1. La ley de Ohm define la relación entre tres cantidades básicas. ¿Cuáles son estas cantidades?
2. Escriba la fórmula de la ley de Ohm para corriente.
3. Escriba la fórmula de la ley de Ohm para voltaje.
4. Escriba la fórmula de la ley de Ohm para resistencia.
5. Si el voltaje a través de un resistor de valor fijo se triplica, ¿la corriente se incrementa o disminuye, y en cuánto?
6. Si el voltaje a través de un resistor fijo se reduce a la mitad, ¿cuánto cambiará la corriente?
7. Existe un voltaje fijo a través de un resistor, y se lee una corriente de 1 A. Si se reemplaza el resistor por otro con el doble de resistencia, ¿cuánta corriente se leerá?
8. En un circuito el voltaje se duplica y la resistencia se reduce a la mitad. ¿Se incrementaría o reduciría la corriente y, si lo hace, en cuánto?
9. En un circuito, $V = 2$ V e $I = 10$ mA. Si V cambia a 1 V, ¿cuál será el valor de I?
10. Si $I = 3$ A a cierto voltaje, ¿qué valor tendrá si el voltaje se duplica?

3–2 CÁLCULO DE LA CORRIENTE

Los ejemplos dados en esta sección ilustran la fórmula de la ley de Ohm $I = V/R$.

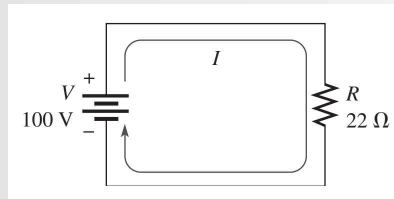
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Calcular la corriente en un circuito**
  - Utilizar la ley de Ohm para determinar la corriente cuando conozca los valores de voltaje y resistencia
  - Utilizar los valores de voltaje y resistencia expresados con prefijos métricos

Los siguientes ejemplos utilizan la fórmula $\boldsymbol{I = V/R}$. Para obtener la corriente en amperes, el valor del voltaje debe estar en volts y el de la resistencia en ohms.

EJEMPLO 3–3 ¿Cuántos amperes de corriente hay en el circuito de la figura 3-6?

▶ FIGURA 3–6



Solución Utilice la fórmula $I = V/R$, y sustituya 100 V en lugar de V y 22 Ω en lugar de R.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{100\ \text{V}}{22\ \Omega} = \mathbf{4.55\ A}$$

Problema relacionado Si R cambia a 33 Ω en la figura 3-6, ¿cuál es la corriente?



Use el archivo Multisim E03-03 para verificar los resultados encontrados en este ejemplo y confirmar su cálculo para el problema relacionado.

EJEMPLO 3–4 Si la resistencia que aparece en la figura 3-6 cambia a 47 Ω y el voltaje a 50 V, ¿cuál es el nuevo valor de la corriente?

Solución Sustituya $V = 50$ V y $R = 47\ \Omega$ en la fórmula $I = V/R$.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{50\ \text{V}}{47\ \Omega} = \mathbf{1.06\ A}$$

Problema relacionado Si $V = 5$ V y $R = 1000\ \Omega$, ¿cuál es la corriente?

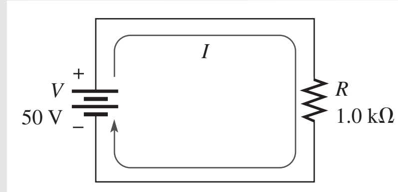
Unidades con prefijos métricos

En electrónica, los valores de resistencia de miles de o incluso de millones de ohms son comunes. Los prefijos métricos *kilo* (k) y *mega* (M) se utilizan para indicar valores grandes. Por tanto, los miles de ohms se expresan en kilohms (kΩ), y los millones de ohms se expresan en megohms

(MΩ). Los cuatro ejemplos siguientes ilustran cómo utilizar kilohms y megaohms para calcular la corriente. Volts (V) divididos entre kilohms (kΩ) dan por resultado miliamperes (mA). Volts (V) divididos entre megaohms (MΩ) dan por resultado microamperes (μA).

EJEMPLO 3–5 Determine la corriente en el circuito mostrado en la figura 3-7.

▶ FIGURA 3–7



Solución Recuerde que 1.0 kΩ es lo mismo que $1 \times 10^3\ \Omega$. Use la fórmula $I = V/R$ y sustituya 50 V por V y $10^3\ \Omega$ por R.

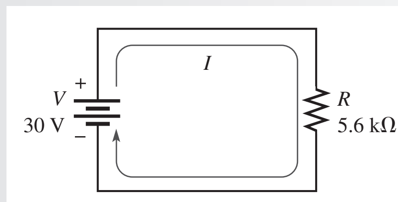
$$I = \frac{V}{R} = \frac{50\text{ V}}{1.0\text{ k}\Omega} = \frac{50\text{ V}}{1 \times 10^3\ \Omega} = 50 \times 10^{-3}\text{ A} = \mathbf{50\ mA}$$

Problema relacionado Determine la corriente en el circuito de la figura 3-7 si R cambia a 10 kΩ.

En el ejemplo 3-5, 50×10^{-3} A se expresa como 50 miliamperes (50 mA). Esto puede ser ventajoso cuando divida volts entre kilohms. La corriente estará en miliamperes, como se ilustra en el ejemplo 3-6.

EJEMPLO 3–6 ¿Cuántos miliamperes hay en el circuito de la figura 3-8?

▶ FIGURA 3–8



Solución Cuando se dividen volts entre kilohms, se obtiene la corriente en miliamperes.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{30\text{ V}}{5.6\text{ k}\Omega} = \mathbf{5.36\ mA}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la corriente en miliamperes si R cambia a 2.2 kΩ?

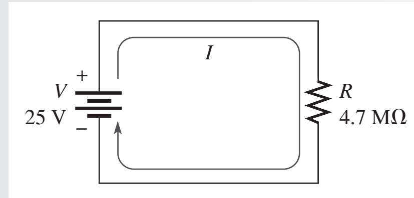


Use el archivo Multisim E03-06 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Si se aplican volts cuando los valores de resistencia están en megaohms, la corriente está en microamperes (μA), como indican los ejemplos 3-5 y 3-6.

EJEMPLO 3–7 Determine la cantidad de corriente presente en el circuito de la figura 3-9.

▶ FIGURA 3–9



Solución Recuerde que 4.7 MΩ es igual a $4.7 \times 10^6 \Omega$. Sustituya V por 25 V y R por $4.7 \times 10^6\ \Omega$.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{25\text{ V}}{4.7\text{ M}\Omega} = \frac{25\text{ V}}{4.7 \times 10^6\ \Omega} = 5.32 \times 10^{-6}\text{ A} = \mathbf{5.32\ \mu A}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la corriente si V se incrementa a 100 V en la figura 3-6?

EJEMPLO 3–8 Cambie el valor de R en la figura 3-9 a 1.8 MΩ. ¿Cuál es el nuevo valor de la corriente?

Solución Cuando se dividen volts entre megaohms, se obtiene la corriente en microamperes.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{25\text{ V}}{1.8\text{ M}\Omega} = \mathbf{13.9\ \mu A}$$

Problema relacionado Si R se duplica en el circuito de la figura 3-6, ¿cuál es el nuevo valor de la corriente?

Los voltajes pequeños, por lo general de menos de 50 V, son comunes en circuitos semiconductores. De vez en cuando, sin embargo, se encuentran voltajes grandes. Por ejemplo, en algunos receptores de televisión el suministro de alto voltaje es de alrededor de 20,000 V (20 kilovolts o 20 kV), y los voltajes generados por las compañías de electricidad pueden ser de hasta 345,000 (345 kV). Los dos ejemplos siguientes ilustran cómo utilizar valores de voltaje en el intervalo de kilovolts para calcular la corriente.

EJEMPLO 3–9 ¿Cuánta corriente es producida por un voltaje de 24 kV a través de un resistor de 12 kΩ?

Solución Como los kilovolts se dividen entre kilohms, los prefijos se cancelan; por consiguiente, la corriente está en amperes.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24\text{ kV}}{12\text{ k}\Omega} = \frac{24 \times 10^3\text{ V}}{12 \times 10^3\ \Omega} = \mathbf{2\ A}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la corriente en mA producida por 1 kV a través de un resistor de 27 kΩ?

EJEMPLO 3–10 ¿Cuánta corriente hay a través de un resistor de 100 MΩ cuando se aplican 50 kV?

Solución En este caso, divida 50 kV entre 100 MΩ para obtener la corriente. Sustituya 50 kV por 50×10^3 y 100 MΩ por $100 \times 10^6\ \Omega$.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{50\text{ kV}}{100\text{ M}\Omega} = \frac{50 \times 10^3\text{ V}}{100 \times 10^6\ \Omega} = 0.5 \times 10^{-3}\text{ A} = \mathbf{0.5\ mA}$$

Recuerde que la potencia de diez en el denominador se resta de la potencia de diez en el numerador. De modo que 50 se dividió entre 100 y se obtuvo 0.5, y 6 se restó de 3 para obtener 10^{-3}.

Problema relacionado ¿Cuánta corriente hay a través de un resistor de 6.8 MΩ cuando se aplican 10 kV?

REPASO DE LA SECCIÓN 3-2

En los problemas 1 a 4, calcule *I*.

1. $V = 10$ V y $R = 5.6\ \Omega$.
2. $V = 100$ V y $R = 560\ \Omega$.
3. $V = 5$ V y $R = 2.2$ kΩ.
4. $V = 15$ V y $R = 4.7$ MΩ.
5. Si a través de un resistor de 4.7 MΩ se aplican 20 kV, ¿cuánta corriente se produce?
6. ¿Cuánta corriente producirán 10 kV a través de un resistor de 2.2 MΩ?

3–3 CÁLCULO DEL VOLTAJE

Los ejemplos de esta sección ilustran la expresión de la ley de Ohm $V = IR$.

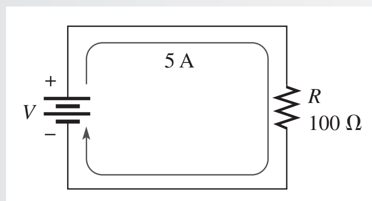
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Calcular el voltaje en un circuito**
  - Utilizar la ley de Ohm para encontrar el voltaje cuando se conocen los valores de corriente y resistencia
  - Utilizar los valores de corriente y resistencia expresados con prefijos métricos

Los ejemplos siguientes utilizan la fórmula $V = IR$. Para obtener el voltaje en volts, el valor de *I* debe expresarse en amperes y el de *R* en ohms.

EJEMPLO 3–11 En el circuito de la figura 3-10, ¿cuánto voltaje se requiere para producir 5 A de corriente?

▶ FIGURA 3–10



Solución Sustituya *I* por 5 A y *R* por 100 Ω en la fórmula $V = IR$.

$$V = IR = (5\text{ A})(100\ \Omega) = \mathbf{500\ V}$$

Por tanto, se requieren 500 V para producir 5 A de corriente a través de un resistor de 100 Ω.

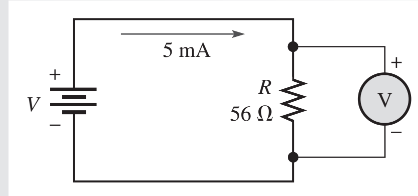
Problema relacionado En la figura 3-10, ¿cuánto voltaje se requiere para producir 12 A de corriente?

Unidades con prefijos métricos

Los dos ejemplos siguientes ilustran cómo se utilizan los valores de corriente en los intervalos de miliamperes (mA) y microamperes (μA) para calcular voltaje.

EJEMPLO 3–12 ¿Cuál será la lectura de voltaje a través del resistor de la figura 3-11?

▶ FIGURA 3–11



Solución Cinco miliamperes son iguales a 5×10^{-3} A. Sustituya los valores dados para I y R en la fórmula $V = IR$.

$$V = IR = (5\text{ mA})(56\ \Omega) = (5 \times 10^{-3}\text{ A})(56\ \Omega) = 280 \times 10^{-3}\text{ V} = \mathbf{280\ mV}$$

Cuando se multiplican miliamperes por ohms, se obtienen milivolts.

Problema relacionado En la figura 3-11, ¿cuánto voltaje se mide a través de R si $R = 33\ \Omega$ e $I = 1.5$ mA?



Use el archivo Multisim E03-12 para verificar los resultados calculados en el ejemplo y confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 3–13 Suponga que a través de un resistor de 10 Ω fluye una corriente de 8 μA. ¿Cuál es el voltaje a través del resistor?

Solución Ocho microamperes son iguales a 8×10^{-6} A. Sustituya los valores de I y R en la fórmula $V = IR$.

$$V = IR = (8\ \mu\text{A})(10\ \Omega) = (8 \times 10^{-6}\text{ A})(10\ \Omega) = 80 \times 10^{-6}\text{ V} = \mathbf{80\ \mu V}$$

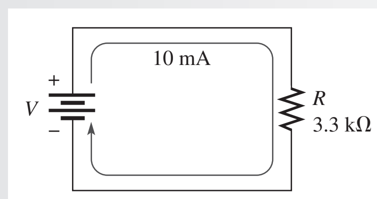
Cuando se multiplican microamperes por ohms, se obtienen microvolts.

Problema relacionado Si a través de un resistor de 47 Ω fluyen 3.2 μA, ¿cuál es el voltaje a través del resistor?

Los dos ejemplos siguientes ilustran cómo utilizar valores de resistencia en los intervalos de kilohms (kΩ) y megaohms (MΩ) para calcular voltaje.

EJEMPLO 3–14 Por el circuito de la figura 3-12 circula una corriente de 10 mA. ¿Cuál es el voltaje?

▶ FIGURA 3–12



Solución Diez miliamperes son iguales a 10×10^{-3} A y 3.3 kΩ son iguales a 3.3×10^{3} Ω. Sustituya estos valores en la fórmula $V = IR$.

$$V = IR = (10\,\text{mA})(3.3\,\text{k}\Omega) = (10 \times 10^{-3}\,\text{A})(3.3 \times 10^{3}\,\Omega) = \mathbf{33\,V}$$

Advierta que 10^{-3} y 10^{3} se eliminan entre sí. Por consiguiente, los miliamperes eliminan a los kilohms cuando se multiplican y el resultado son volts.

Problema relacionado Si la corriente en la figura 3-12 es de 25 mA, ¿cuál es el voltaje?



Use el archivo Multisim E03-14 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 3–15 Si a través de un resistor de 4.7 MΩ circula una corriente de 50 μA, ¿cuál es el voltaje?

Solución Cincuenta microamperes son iguales a 50×10^{-6} A y 4.7 MΩ son 4.7×10^{6} Ω. Sustituya estos valores en la fórmula $V = IR$.

$$V = IR = (50\,\mu\text{A})(4.7\,\text{M}\Omega) = (50 \times 10^{-6}\,\text{A})(4.7 \times 10^{6}\,\Omega) = \mathbf{235\,V}$$

Observe que 10^{-6} y 10^{6} se eliminan entre sí. Por consiguiente, los microamperes eliminan a los megohms cuando se multiplican y el resultado son volts.

Problema relacionado Si a través de un resistor de 3.9 MΩ circulan 450 μA, ¿cuál es el voltaje?

REPASO DE LA SECCIÓN 3-3

En los problemas 1-7, calcule V.

1. $I = 1$ A y $R = 10$ Ω.
2. $I = 8$ A y $R = 470$ Ω.
3. $I = 3$ mA y $R = 100$ Ω.
4. $I = 25$ μA y $R = 56$ Ω.
5. $I = 2$ mA y $R = 1.8$ kΩ.
6. $I = 5$ mA y $R = 100$ MΩ.
7. $I = 10$ μA y $R = 2.2$ MΩ.
8. ¿Cuánto voltaje se requiere para producir 100 mA a través de un resistor de 4.7 kΩ?
9. ¿Cuánto voltaje se requiere para producir 3 mA de corriente en un resistor de 3.3 kΩ?
10. Una batería produce 2 A a través de una carga resistiva de 6.8 Ω. ¿Cuál es el voltaje de la batería?

3–4 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA

Los ejemplos de esta sección ilustran la expresión de la ley de Ohm $R = V/I$.

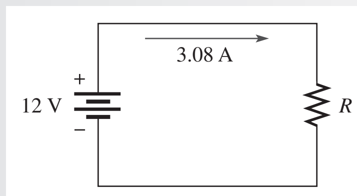
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Calcular la resistencia en un circuito**
  - Utilizar la ley de Ohm para encontrar la resistencia cuando se conocen los valores de voltaje y corriente
  - Utilizar valores de corriente y voltaje expresados con prefijos métricos

Los siguientes ejemplos utilizan la fórmula $R = V/I$. Para obtener la resistencia en ohms, el valor de I se debe expresar en amperes y el de V en volts.

EJEMPLO 3–16 En el circuito de la figura 3-13, ¿cuánta resistencia se requiere para extraer 3.08 A de corriente de la batería?

▶ **FIGURA 3–13**



Solución Sustituya V por 12 V e I por 3.08 A en la fórmula $R = V/I$.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12\text{ V}}{3.08\text{ A}} = \mathbf{3.90\ \Omega}$$

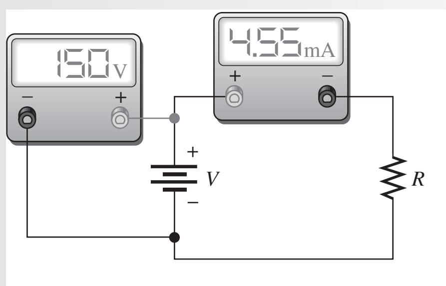
Problema relacionado En la figura 3-13, ¿a qué valor debe ser cambiada R para lograr una corriente de 5.45 A?

Unidades con prefijos métricos

Los dos ejemplos siguientes ilustran cómo utilizar valores de corriente en los intervalos de miliamperes (mA) y microamperes (μA) para calcular resistencia.

EJEMPLO 3–17 Suponga que el amperímetro mostrado en la figura 3-14 indica 4.55 mA de corriente y el voltímetro lee 150 V. ¿Cuál es el valor de R?

▶ **FIGURA 3–14**



Solución 4.55 mA son lo mismo que 4.55×10^{-3} A. Sustituya los valores de voltaje y corriente en la fórmula $R = V/I$.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{150\text{ V}}{4.55\text{ mA}} = \frac{150\text{ V}}{4.55 \times 10^{-3}\text{ A}} = 33 \times 10^{3}\ \Omega = \mathbf{33\ k\Omega}$$

Cuando los volts se dividen entre miliamperes, la resistencia resulta en kilohms.

Problema relacionado Si el amperímetro indica 1.10 mA y el voltímetro lee 75 V, ¿cuál es el valor de R?



Use el archivo Multisim E03-17 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y confirmar su cálculo para el problema relacionado.

EJEMPLO 3–18 Suponga que se cambia el valor del resistor mostrado en la figura 3-14. Si el voltaje de la batería aún es de 150 V y el amperímetro lee 68.2 μA, ¿cuál es el nuevo valor del resistor?

Solución 68.2 μA son lo mismo que 68.2×10^{-6} A. Sustituya los valores de V e I en la ecuación para R.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{150\text{ V}}{68.2\,\mu\text{A}} = \frac{150\text{ V}}{68.2 \times 10^{-6}\text{ A}} = 2.2 \times 10^{6}\,\Omega = \mathbf{2.2\,M\Omega}$$

Cuando los volts se dividen entre microamperes, las unidades de resistencia son megaohms.

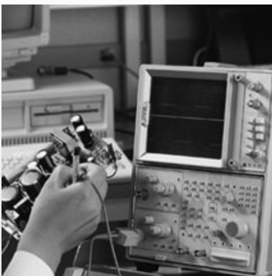
Problema relacionado Si se cambia el resistor mostrado en la figura 3-14 de modo que el amperímetro lea 48.5 μA, ¿cuál es el nuevo valor del resistor? Considere $V = 150$ V.

REPASO DE LA SECCIÓN 3-4

En los problemas 1 a 5, calcule R.

1. $V = 10$ V e $I = 2.13$ A.
2. $V = 270$ V e $I = 10$ A.
3. $V = 20$ kV e $I = 5.13$ A.
4. $V = 15$ V e $I = 2.68$ mA.
5. $V = 5$ V e $I = 2.27$ μA.
6. Se tiene un resistor a través del cual se leen 25 V y el amperímetro indica 53.2 mA de corriente. ¿Cuál es el valor del resistor en kilohms? ¿Y en ohms?

3–5 INTRODUCCIÓN A LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS



Los técnicos deben ser capaces de diagnosticar y reparar circuitos y sistemas que funcionan mal. En esta sección, mediante un ejemplo simple, se aprenderá un método general para abordar la localización de fallas. La cobertura del tema constituye una parte importante de este libro de texto, por lo que muchos capítulos incluyen una sección de localización de fallas y problemas de localización de fallas, incluidos circuitos Multisim, para incrementar la destreza.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir un método básico de abordar la localización de fallas**
  - Mencionar tres pasos incluidos en la localización de fallas
  - Explicar el significado de división a la mitad
  - Analizar y comparar las tres mediciones básicas de voltaje, corriente y resistencia

La **localización de fallas** es la aplicación de razonamiento lógico combinado con un conocimiento completo de la operación de un circuito o sistema para corregir un funcionamiento defectuoso. El método básico de abordar la localización de fallas se compone de tres pasos: *análisis*, *planificación*, y *medición*. Este método de 3 pasos se conoce como APM (por sus siglas en inglés).

Análisis

El primer paso a seguir en la localización de fallas en un circuito es analizar los indicios o síntomas de la falla. El análisis puede comenzar buscando la respuesta a ciertas preguntas:

1. ¿Alguna vez ha funcionado el circuito?
2. Si el circuito trabajó alguna vez, ¿en qué condiciones falló?
3. ¿Cuáles son los síntomas de la falla?
4. ¿Cuáles son las posibles causas de la falla?

Planificación

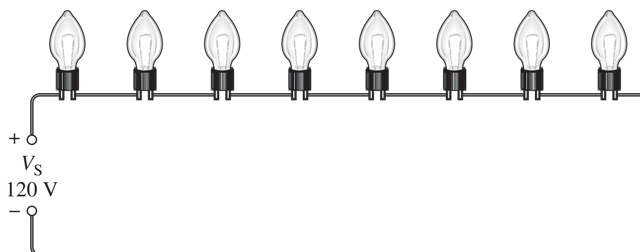
El segundo paso incluido en el proceso de localización de fallas, después de analizar los indicios, es formular un plan lógico de ataque. Una planificación apropiada puede ahorrar mucho tiempo. El saber cómo funciona un circuito es un requisito previo para implementar un plan de localización de fallas. Si no se está seguro de cómo opera el circuito, debe tomarse el tiempo necesario para revisar diagramas de circuito (esquemáticos), instrucciones de operación, y otra información pertinente. Un diagrama con los voltajes apropiados marcados en diversos puntos resulta particularmente útil. Aunque el razonamiento lógico es quizás la herramienta más importante en la localización de fallas, rara vez puede resolver el problema por sí solo.

Medición

El tercer paso consiste en reducir las posibles fallas realizando mediciones pensadas cuidadosamente. Estas mediciones casi siempre confirman la dirección que se está tomando en la resolución del problema, o pueden apuntar hacia una nueva dirección que se deberá tomar. De vez en cuando, es posible encontrar un resultado totalmente inesperado.

Un ejemplo de APM

El proceso razonado que forma parte del método APM puede ser ilustrado mediante un ejemplo simple. Supongamos que se tiene una hilera de 8 focos decorativos de 12 V conectados en serie a una fuente de 120 V V_S, como se muestra en la figura 3-15. Este circuito funcionaba apropiadamente, pero dejó de hacerlo después de ser cambiado de lugar. Cuando se conectó en el nuevo lugar, los focos no se encendieron. ¿Cómo procedería usted para determinar el problema?



▲ FIGURA 3–15

Una serie de focos conectada a una fuente de voltaje.

El proceso razonado de análisis Es posible que usted piense algo parecido a lo siguiente cuando proceda a analizar la situación:

- Como el circuito funcionaba antes de cambiarlo de lugar, el problema podría ser que no hay voltaje en el nuevo lugar.
- Tal vez el alambrado eléctrico se aflojó o desprendió cuando se hizo el cambio de lugar.
- Es posible que un foco esté fundido o flojo en su portalámpara.

Con este razonamiento, usted ha considerado las posibles causas y fallas que pueden haber ocurrido. El proceso de razonamiento continúa:

- El hecho de que el circuito estuviese trabajando elimina la posibilidad de que haya sido alambrado de manera impropia.
- Si la falla se debe a una trayectoria abierta, es improbable que haya más de una interrupción que pudiera deberse a una mala conexión o a un foco fundido.

Ahora usted ya ha analizado y está listo para planificar el proceso de encontrar la falla en el circuito.

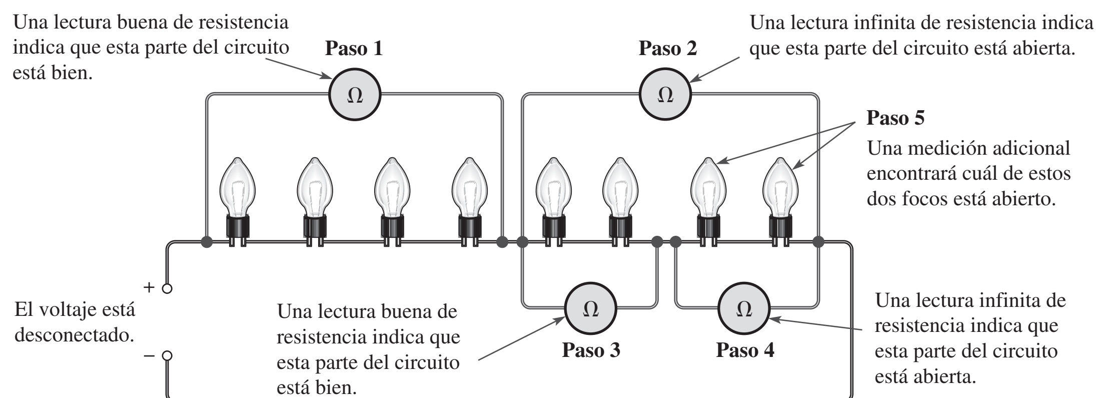
El proceso razonado de planificación La primera parte de su plan es medir en busca de voltaje en el nuevo lugar. Si el voltaje está presente, entonces el problema se encuentra en la hilera de luces. Si el voltaje no está presente, revise el cortacircuito en la caja de distribución que haya en la casa. Antes de reponer los cortacircuitos, deberá pensar acerca de por qué pudo haberse disparado el cortacircuito. Suponga que sí hay voltaje. Esto significa que el problema se encuentra en la hilera de luces.

La segunda parte de su plan es medir la resistencia en la hilera de luces o los voltajes a través de los focos. La decisión de si medir la resistencia o el voltaje no es importante y puede tomarse con base en la facilidad de realizar la prueba. Rara vez se desarrolla un plan de localización de fallas tan completo que todas las posibles contingencias queden incluidas. Con frecuencia habrá que modificarlo conforme se vaya avanzando.

El proceso de medición Prosiga con la primera parte de su plan utilizando un multímetro para verificar el voltaje en el nuevo lugar. Suponga que la medición indica un voltaje de 120 V. Ahora ha eliminado la posibilidad de que no haya voltaje. Usted sabe que, como hay voltaje a través de la hilera y no hay corriente porque ningún foco está prendido, entonces debe haber una apertura en la trayectoria de la corriente. Tal vez un foco está fundido, una conexión en el portafoco está interrumpida, o el alambre está roto.

A continuación, usted decide localizar la interrupción midiendo la resistencia con el multímetro. Al aplicar el pensamiento lógico, decide medir la resistencia de cada una de las mitades de la hilera en lugar de medirla en cada foco. Midiendo la resistencia de la mitad de los focos a la vez, en general puede reducir el esfuerzo requerido para localizar la apertura. Esta técnica es un procedimiento de localización de fallas denominado **división a la mitad.**

Una vez identificada la mitad donde se localiza la apertura de trayectoria, indicada por una resistencia infinita, usted utiliza otra vez la división a la mitad en la mitad defectuosa y continúa hasta que la falla se reduce a un foco o una conexión defectuosa. Este proceso se muestra en la figura 3-16, suponiendo, para propósitos de ilustración, que el séptimo foco está fundido.



▲ FIGURA 3–16

Ilustración del método de división a la mitad para la localización de fallas. Los pasos numerados indican la secuencia en la cual se mueve el multímetro de una posición a otra.

Como se puede ver en la figura, el método de división a la mitad se lleva, en este caso particular, un máximo de cinco mediciones para identificar el foco fundido. Si usted hubiera decidido medir cada foco individualmente empezando por la izquierda, habría tenido que hacer siete mediciones. En algunas ocasiones la división a la mitad ahorra pasos, en otras no. El número de pasos requerido depende de dónde se hagan las mediciones y en qué secuencia.

Desafortunadamente, la mayor parte de la localización de fallas es más difícil que este ejemplo. Sin embargo, el análisis y la planeación son esenciales para lograr una efectiva localización de fallas en cualquier situación. Conforme se hacen las mediciones, el plan con frecuencia es modificado; el localizador de fallas experimentado reduce la búsqueda ajustando los síntomas y las mediciones a una posible causa. En algunos casos, el equipo de bajo costo simplemente es desechado cuando los costos de localización y reparación de fallas son comparables a los de reemplazo.

Comparación de mediciones de *V*, *R* e *I*

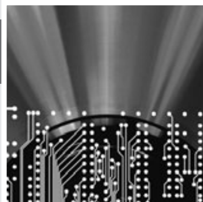
Como ya se sabe por la sección 2-7, es posible medir voltaje, corriente o resistencia en un circuito. Para medir voltaje, se coloca el voltímetro en paralelo a través del componente, es decir, se ubica un conector en cada lado del componente. Esto hace que, de los tres tipos de medición, las mediciones de voltaje sean las más fáciles de realizar.

Para medir resistencia, el ohmmetro se conecta a través del componente; sin embargo, primero se debe desconectar el voltaje y en ocasiones el propio componente tiene que ser retirado del circuito. Por consiguiente, las mediciones de resistencia en general son más difíciles que las de voltaje.

Para medir corriente, el amperímetro se coloca en serie con el componente, es decir, el amperímetro debe estar en línea con la trayectoria de la corriente. Para hacer esto se debe desconectar un conector del componente antes de conectar el amperímetro. Esto, en general, hace que las mediciones de corriente sean las más difíciles de realizar.

REPASO DE LA SECCIÓN 3-5

1. Nombre los tres pasos incluidos en el método APM para abordar la localización de fallas.
2. Explique la idea básica de la técnica de división a la mitad.
3. ¿Por qué en un circuito los voltajes son más fáciles de medir que las corrientes?



Una aplicación de circuito

En esta aplicación, una caja de resistencia existente que se utilizará como parte de una configuración de prueba en el laboratorio tiene que ser revisada y modificada. La tarea de usted es modificar el circuito de modo que satisfaga los requerimientos de la nueva aplicación. Tendrá que aplicar su conocimiento de la ley de Ohm para completar esta asignación.

Las especificaciones son las siguientes:

1. Cada resistor puede ser seleccionado mediante un interruptor y sólo se selecciona uno a la vez.
2. El valor de resistor más bajo tiene que ser de 10 Ω.
3. Cada resistencia sucesivamente más alta en la secuencia de interrupción debe incrementarse una década (10 veces) con respecto a la previa.
4. El valor máximo de resistor debe ser de 1.0 MΩ.
5. El voltaje máximo a través de cualquier resistor presente en la caja será de 4 V.
6. Se requieren dos resistores adicionales, uno para limitar la corriente a 10 mA ± 10% y el otro para limitar la corriente a 5 mA ± 10% con una caída de 4 V.

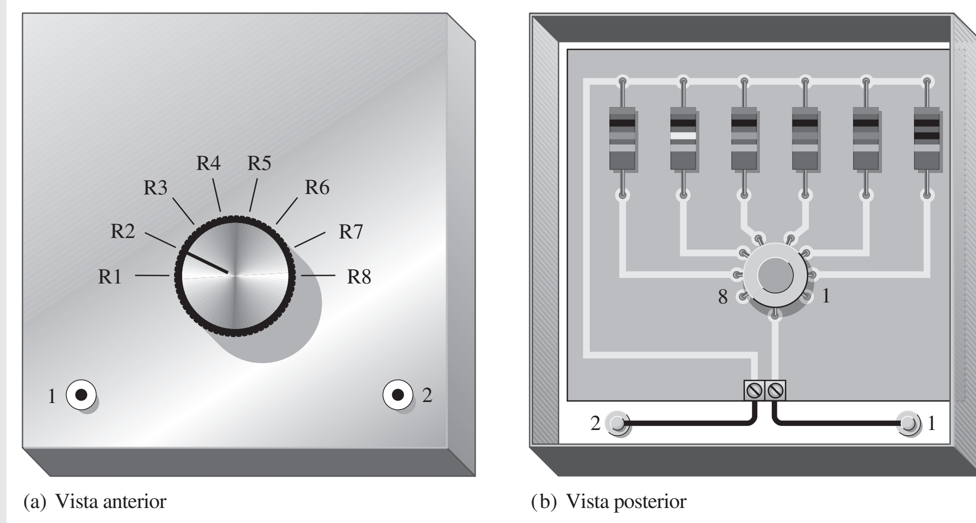
El circuito de resistores existente

La caja de resistencias existente se muestra tanto en vista anterior como posterior en la figura 3-17. El interruptor es del tipo rotatorio.

El diagrama

- ◆ Con arreglo a la figura 3-17, determine los valores de los resistores y trace el diagrama del circuito existente. Determine la numeración de los resistores conforme a los rótulos *R* que aparecen en la vista anterior.

▶ FIGURA 3–17



(a) Vista anterior (b) Vista posterior

El diagrama con arreglo a los nuevos requerimientos

- Trace el diagrama de un circuito que realice lo siguiente:
  1. Entre las terminales 1 y 2 de la caja, un resistor a la vez tiene que ser conectado por el interruptor.
  2. Proporcionar valores de resistencia del arreglo de resistores seleccionables con el conmutador comenzando en 10 Ω e incrementándose en aumentos de década hasta 1.0 MΩ.
  3. Cada uno de los resistores debe ser seleccionable en una secuencia ascendente de posiciones adyacentes del interruptor.
  4. Debe haber dos resistores seleccionables con el interruptor, uno está en la posición 1 del interruptor (mostrado en la vista posterior de la figura 3-17) y debe limitar la corriente a 10 mA ± 10% con una caída de 4 V, y el otro se encuentra en la posición 8 del interruptor y debe limitar la corriente a 5 mA ± 10% con una caída de 4 V.
  5. Todos los resistores deben ser valores estándar con un 10% de tolerancia. Vea el apéndice A para consultar los valores estándar de los resistores.
- Determine las modificaciones que deben hacerse al circuito existente para satisfacer las especificaciones y desarrollar un lista detallada de los cambios incluidos en los valores de resistencia, el alambrado eléctrico, y nuevos componentes. Deberá numerar cada punto en el diagrama para tener una referencia fácil.

Un procedimiento de prueba

- Después de que la caja de resistencias ha sido modificada para satisfacer las nuevas especificaciones, debe ser probada para ver si funciona bien. Determine cómo probaría la caja de resistencias y qué instrumentos utilizaría. Luego detalle su procedimiento de prueba en un formato paso a paso.

Localización de fallas en el circuito

- Se conecta un ohmmetro a través de las terminales 1 y 2 de la caja de resistencia. Determine la falla más probable en cada uno de los siguientes casos.
  1. El ohmmetro muestra una resistencia infinitamente alta cuando el interruptor está en la posición 3.
  2. El ohmmetro muestra una resistencia infinitamente alta en todas las posiciones del interruptor.
  3. El ohmmetro muestra un valor incorrecto de resistencia cuando el interruptor está en la posición 6.

Repaso

1. Explique de qué manera se aplica la ley de Ohm a esta aplicación.
2. Determine la corriente a través de cada resistor cuando se les aplican 4 V.

RESUMEN

- El voltaje y la corriente son linealmente proporcionales.
- La ley de Ohm suministra la relación de voltaje, corriente y resistencia.
- La corriente es inversamente proporcional a la resistencia.
- Un kilohm (kΩ) es igual a mil ohms.
- Un megaohm (MΩ) es igual a un millón de ohms.
- Un microampere (μA) es la millonésima parte de un ampere.
- Un miliampere (mA) es la milésima parte de un ampere.

- Utilice $I = V/R$ para calcular la corriente.
- Utilice $V = IR$ para calcular el voltaje.
- Utilice $R = V/I$ para calcular la resistencia.
- APM es un útil método de 3 pasos para abordar la localización de fallas, consiste en analizar, planificar y medir.
- La división a la mitad es una técnica de localización de fallas que puede ser utilizada para reducir el número de mediciones requerido para localizar un problema.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas utilizados en este capítulo se definen en el glosario incluido al final del libro.

Ley de Ohm Una ley que estipula que la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia.

Lineal Caracterizado por una relación de línea recta.

Localización de fallas Proceso sistemático de aislar, identificar y corregir una falla en un circuito o sistema.

FÓRMULAS

3–1 $I = \frac{V}{R}$ Forma de la ley de Ohm para calcular corriente

3–2 $V = IR$ Forma de la ley de Ohm para calcular voltaje

3–3 $R = \frac{V}{I}$ Forma de la ley de Ohm para calcular resistencia

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. La ley de Ohm estipula que
(a) la corriente es igual al voltaje multiplicado por la resistencia
(b) el voltaje es igual a la corriente multiplicada por la resistencia
(c) la resistencia es igual a la corriente dividida entre el voltaje
(d) el voltaje es igual al cuadrado de la corriente multiplicada por la resistencia

2. Cuando el voltaje a través de un resistor se duplique, la corriente
(a) se triplicará **(b)** se reducirá a la mitad **(c)** se duplicará **(d)** no cambiará

3. Cuando se aplican 10 V a través de un resistor de 20 Ω, la corriente es
(a) 10 A **(b)** 0.5 A **(c)** 200 A **(d)** 2 A

4. Cuando circulan 10 mA de corriente a través de un resistor de 1.0 kΩ, el voltaje del resistor es
(a) 100 V **(b)** 0.1 V **(c)** 10 kV **(d)** 10 V

5. Si a través de un resistor se aplican 20 V y circulan 6.06 mA de corriente, la resistencia es
(a) 3.3 kΩ **(b)** 33 kΩ **(c)** 330 kΩ **(d)** 3.03 kΩ

6. Una corriente de 250 μA a través de un resistor de 4.7 kΩ produce una caída de voltaje de
(a) 53.2 V **(b)** 1.18 mV **(c)** 18.8 V **(d)** 1.18 V

7. Una resistencia de 2.2 MΩ se conecta a través de una fuente de 1 kV. La corriente resultante es de aproximadamente
(a) 2.2 mA **(b)** 0.455 mA **(c)** 45.5 μA **(d)** 0.455 A

8. ¿Cuánta resistencia se requiere para limitar la corriente de una batería de 10 V a 1 mA?
(a) 100 Ω **(b)** 1.0 kΩ **(c)** 10 Ω **(d)** 10 kΩ

9. Un calentador eléctrico absorbe 2.5 A de una fuente de 110 V. La resistencia del elemento calentador es
(a) 275 Ω **(b)** 22.7 mΩ **(c)** 44 Ω **(d)** 440 Ω

10. La corriente que pasa a través del foco de una linterna es de 20 mA y el voltaje total de la batería es de 4.5 V. La resistencia del foco es
(a) 90 Ω **(b)** 225 Ω **(c)** 4.44 Ω **(d)** 45 Ω

EXAMEN RÁPIDO

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Si la corriente a través de un resistor fijo cambia de 10 a 12 mA, el voltaje del resistor
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
2. Si el voltaje a través de un resistor fijo cambia de 10 a 7 V, la corriente del resistor
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
3. El voltaje a través de un resistor variable es de 5 V. Si la resistencia se reduce, en el resistor la corriente
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
4. Si el voltaje a través de un resistor se incrementa de 5 a 10 V y la corriente se incrementa de 1 a 2 mA, la resistencia
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 3-14.

5. Si la lectura del voltímetro cambia a 175 V, la lectura del amperímetro
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
6. Si *R* cambia a un valor más grande y la lectura del voltímetro permanece en 150 V, la corriente
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
7. Si el resistor se retira del circuito y deja una abertura, la lectura del amperímetro
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
8. Si el resistor se retira del circuito y deja una abertura, la lectura del voltímetro
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 3-21.

9. Si se ajusta el reóstato para incrementar la resistencia, la corriente a través del elemento calentador
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
10. Si se ajusta el reóstato para incrementar la resistencia, el voltaje de la fuente
    (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
11. Si el fusible se abre, el voltaje a través del elemento calentador
    (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
12. Si el voltaje de la fuente se incrementa, el voltaje a través del elemento calentador
    (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
13. Si el fusible se cambia por uno de mayor capacidad, la corriente a través del reóstato
    (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 3-23.

14. Si la lámpara se funde (abre), la corriente
    (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
15. Si la lámpara se funde, el voltaje a través de ella
    (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

Un asterisco (*) indica los problemas más difíciles.
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 3–1 La relación de corriente, voltaje y resistencia

1. En un circuito compuesto de una fuente de voltaje y un resistor, describa qué le sucede a la corriente cuando
   (a) el voltaje se triplica
   (b) el voltaje se reduce en 75%
   (c) la resistencia se duplica

(**d**) la resistencia se reduce en 35%

(**e**) el voltaje se duplica y la resistencia se reduce a la mitad

(**f**) el voltaje y la resistencia se duplican

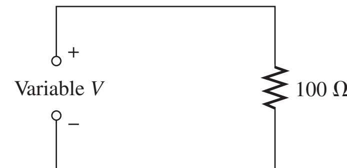
2. Enuncie la fórmula utilizada para encontrar I cuando los valores de V y R son conocidos.

3. Enuncie la fórmula utilizada para encontrar V cuando los valores de I y R son conocidos.

4. Enuncie la fórmula utilizada para encontrar R cuando los valores de V e I son conocidos.

5. Se conecta una fuente de voltaje variable al circuito de la figura 3-18. Comience con 0 V e incremente el voltaje, en pasos de 10 V, hasta 100 V. Determine la corriente en cada voltaje y trace una gráfica de V contra I. ¿Es la gráfica una línea recta? ¿Qué indica la gráfica?

▶ **FIGURA 3–18**



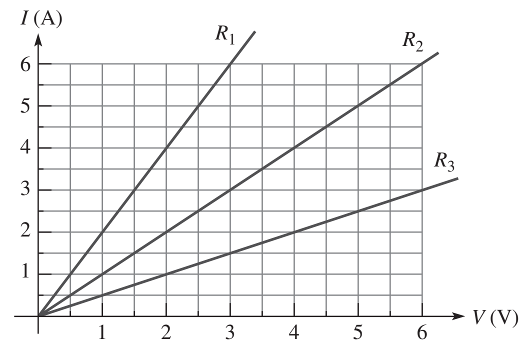
6. En cierto circuito, $I = 5$ mA cuando $V = 1$ V. Determine la corriente para cada uno de los voltajes siguientes en el mismo circuito.

(**a**) $V = 1.5$ V (**b**) $V = 2$ V (**c**) $V = 3$ V

(**d**) $V = 4$ V (**e**) $V = 10$ V

7. La figura 3-19 es una gráfica de corriente contra voltaje para tres valores de resistencia. Determine R_1, R_2 y R_3.

▶ **FIGURA 3–19**

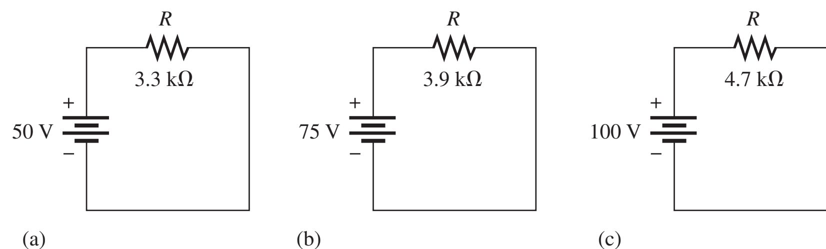


8. Trace la relación corriente-voltaje para un resistor de cuatro bandas con código de colores gris, rojo, rojo, oro.

9. Trace la relación corriente-voltaje para un resistor de cinco bandas con código de colores café, verde, gris, café, rojo.

10. ¿Cuál de los circuitos mostrados en la figura 3-20 tiene más corriente? ¿Cuál tiene menos corriente?

▶ **FIGURA 3–20**



*11. Se mide la corriente en un circuito que opera con una batería de 10 V. El amperímetro lee 50 mA. Más tarde, se observa que la corriente cae a 30 mA. Eliminando la posibilidad de un cambio de resistencia, debe concluirse que el voltaje ha cambiado. ¿Cuánto ha cambiado el voltaje de la batería y cuál es su nuevo valor?

*12. Si se desea incrementar la cantidad de corriente en un resistor de 100 mA a 150 mA cambiando la fuente de 20 V, ¿en cuántos volts deberá cambiar la fuente? ¿A qué nuevo valor deberá ser ajustada?

13. Trace una gráfica de corriente contra voltaje con valores de voltaje que vayan de 10 a 100 V, en incrementos de 10 V, para cada uno de los siguientes valores de resistencia:

(**a**) 1.0 Ω (**b**) 5.0 Ω (**c**) 20 Ω (**d**) 100 Ω

14. ¿La gráfica del problema 13 indica una relación lineal entre voltaje y corriente? Explique su respuesta.

SECCIÓN 3–2 Cálculo de la corriente

15. Determine la corriente en cada caso:

(**a**) $V = 5$ V, $R = 1.0\ \Omega$ (**b**) $V = 15$ V, $R = 10\ \Omega$
(**c**) $V = 50$ V, $R = 100\ \Omega$ (**d**) $V = 30$ V, $R = 15$ kΩ
(**e**) $V = 250$ V, $R = 5.6$ MΩ

16. Determine la corriente en cada caso:

(**a**) $V = 9$ V, $R = 2.7$ kΩ (**b**) $V = 5.5$ V, $R = 10$ kΩ
(**c**) $V = 40$ V, $R = 68$ kΩ (**d**) $V = 1$ kV, $R = 2.2$ kΩ
(**e**) $V = 66$ kV, $R = 10$ MΩ

17. Se conecta un resistor de 10 Ω a través de una batería de 12 V. ¿Cuál es la corriente a través del resistor?

18. Cierto resistor tiene el siguiente código de colores: naranja, naranja, rojo, oro. Determine las corrientes máxima y mínima esperadas cuando se conecta una fuente de 12 V a través del resistor.

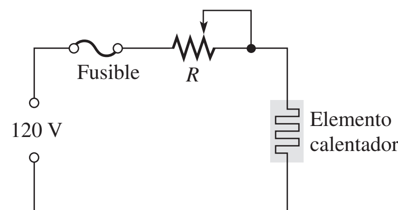
19. Se conecta un resistor de cuatro bandas a través de las terminales de una fuente de 25 V. Determine la corriente del resistor si el código de colores es amarillo, violeta, naranja, plata.

20. Se conecta un resistor de 5 bandas a través de una fuente de 12 V. Determine la corriente si el código de colores es naranja, violeta, amarillo, oro, café.

21. Si el voltaje del problema 20 se duplica, ¿se fundirá un fusible de 0.5 A? Explique su respuesta.

*22. El potenciómetro conectado a un reóstato en la figura 3-21 se utiliza para controlar la corriente suministrada a un elemento calentador. Cuando el reóstato se ajusta a un valor de 8 Ω o menos, el elemento calentador puede quemarse. ¿Cuál es el valor nominal del fusible requerido para proteger el circuito si el voltaje a través del elemento calentador en el punto de corriente máxima es de 100 V, y el voltaje a través del reóstato es la diferencia entre el voltaje del elemento calentador y el voltaje de la fuente?

▶ FIGURA 3–21



SECCIÓN 3–3 Cálculo de voltaje

23. Calcule el voltaje para cada valor de I y R:

(**a**) $I = 2$ A, $R = 18\ \Omega$ (**b**) $I = 5$ A, $R = 56\ \Omega$
(**c**) $I = 2.5$ A, $R = 680\ \Omega$ (**d**) $I = 0.6$ A, $R = 47\ \Omega$
(**e**) $I = 0.1$ A, $R = 560\ \Omega$

24. Calcule el voltaje para cada valor de I y R:

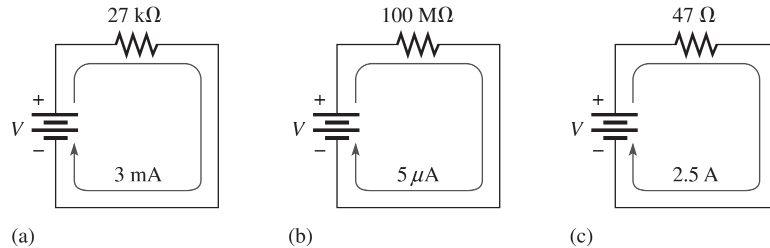
(**a**) $I = 1$ mA, $R = 10\ \Omega$ (**b**) $I = 50$ mA, $R = 33\ \Omega$
(**c**) $I = 3$ A, $R = 5.6$ kΩ (**d**) $I = 1.6$ mA, $R = 2.2$ kΩ

(**e**) $I = 250\ \mu A, R = 1.0\ k\Omega$ (**f**) $I = 500\ mA, R = 1.5\ M\Omega$

(**g**) $I = 850\ \mu A, R = 10\ M\Omega$ (**h**) $I = 75\ \mu A, R = 47\ \Omega$

25. Se leen tres amperes de corriente a través de un resistor de 27 Ω conectado a una fuente de voltaje. ¿Cuánto voltaje produce la fuente?

26. Asigne un valor de voltaje a cada una de las fuentes que aparecen en los circuitos de la figura 3-22 para obtener las cantidades de corriente indicadas.



▲ **FIGURA 3–22**

***27.** Se conecta una fuente de 6 V a un resistor de 100 Ω mediante dos tramos de alambre de cobre calibre 18 de 12 pies de largo. La resistencia total es la resistencia de los dos alambres sumada al resistor de 100 Ω. Determine lo siguiente:

(**a**) Corriente

(**b**) Caída de voltaje en el resistor

(**c**) Caída de voltaje a través de cada tramo de alambre

SECCIÓN 3–4 Cálculo de la resistencia

28. Encuentre la resistencia de un reóstato para cada valor de V e I:

(**a**) $V = 10\ V, I = 2\ A$ (**b**) $V = 90\ V, I = 45\ A$

(**c**) $V = 50\ V, I = 5\ A$ (**d**) $V = 5.5\ V, I = 10\ A$

(**e**) $V = 150\ V, I = 0.5\ A$

29. Calcule la resistencia de un reóstato para cada juego de valores de V e I:

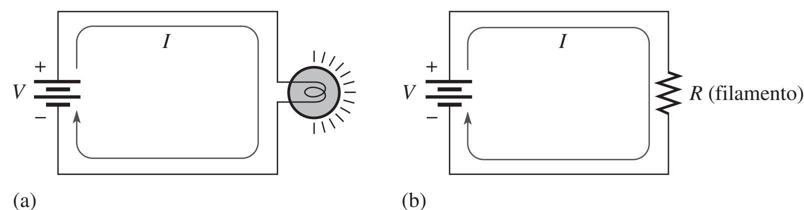
(**a**) $V = 10\ kV, I = 5\ A$ (**b**) $V = 7\ V, I = 2\ mA$

(**c**) $V = 500\ V, I = 250\ mA$ (**d**) $V = 50\ V, I = 500\ \mu A$

(**e**) $V = 1\ kV, I = 1\ mA$

30. Se aplican seis volts a través de un resistor. Se mide una corriente de 2 mA. ¿Cuál es el valor del resistor?

31. En el circuito de la figura 3-23(a), el filamento de una lámpara tiene cierta cantidad de resistencia, la cual está representada por una resistencia equivalente en la figura 3-23(b). Si la lámpara opera con 120 V y 0.8 A de corriente, ¿cuál es la resistencia de su filamento cuando está encendida?

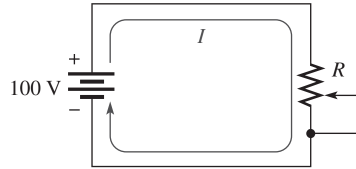


▲ **FIGURA 3–23**

32. Se desconoce la resistencia de cierto dispositivo eléctrico. Usted dispone de una batería de 12 V y un amperímetro. ¿Cómo determinaría el valor de la resistencia desconocida? Trace las conexiones de circuito necesarias.

33. Al variar el reóstato (resistor variable) en el circuito de la figura 3-24, puede cambiar la cantidad de corriente. El ajuste del reóstato es tal que la corriente es de 750 mA. ¿Cuál es el valor de resistencia de este ajuste? Para ajustar la corriente a 1 A, ¿a qué valor de resistencia debe ajustar el reóstato? ¿Cuál es el problema con el circuito?

▶ FIGURA 3–24

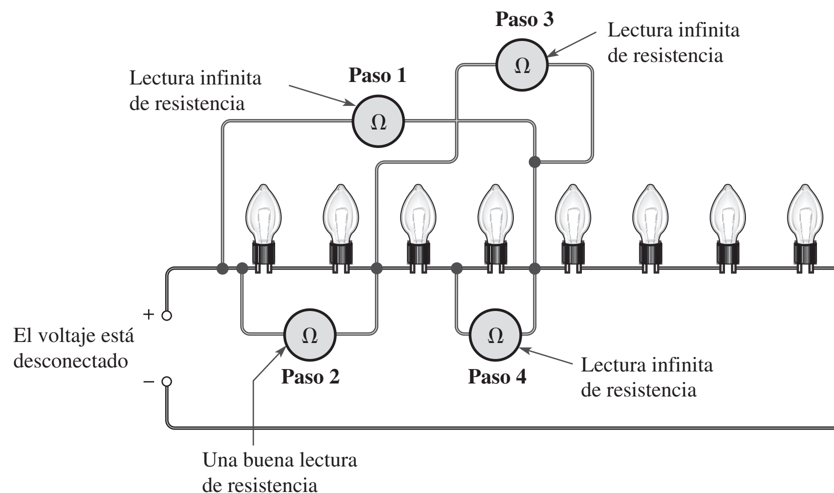


***34.** Un circuito atenuador de luz de 120 V es controlado por un reóstato y está protegido contra corriente excesiva mediante un fusible de 2 A. ¿A qué valor de resistencia mínima puede ser ajustado el reóstato sin que se funda el fusible? Suponga una resistencia de la lámpara de 15 Ω.

35. Repita el problema 34 con un circuito de 110 V y un fusible de 1 A.

SECCIÓN 3–5 Introducción a la localización de fallas

36. En el circuito de luces de la figura 3-25, identifique el foco fundido con base en la serie de lecturas de ohmmetro mostradas.



▲ FIGURA 3–25

37. Suponga que tiene una serie de 32 luces y uno de los focos se fundió. Con el método de división a la mitad, y comenzando por la mitad izquierda del circuito, ¿cuántas lecturas de resistencia tomará localizar el foco fundido si es el décimo séptimo de izquierda a derecha?



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

38. Abra el archivo P03-38 en su CD-ROM y determine cuál de los tres circuitos no está funcionando apropiadamente.

39. Abra el archivo P03-39 y mida los valores de resistencia de los resistores.

40. Abra el archivo P03-40 y determine los valores de la corriente y el voltaje.

41. Abra el archivo P03-41 y determine el valor del voltaje de la fuente y la resistencia.

42. Abra el archivo P03-42 y encuentre el problema con el circuito.

RESPUESTAS

REPASO DE SECCIONES

SECCIÓN 3–1 La relación de corriente, voltaje y resistencia

1. Corriente, voltaje y resistencia
2. $I = V/R$
3. $V = IR$
4. $R = V/I$
5. Cuando se triplica el voltaje, la corriente se incrementa tres veces.
6. Cuando el voltaje se reduce a la mitad, la corriente se reduce a la mitad de su valor original.
7. 0.5 A
8. La corriente se incrementaría cuatro veces si el voltaje se duplica y la resistencia se reduce a la mitad.
9. $I = 5$ mA
10. $I = 6$ A

SECCIÓN 3–2 Cálculo de la corriente

1. $I = 10\text{ V}/5.6\ \Omega = 1.79\text{ A}$
2. $I = 100\text{ V}/560\ \Omega = 179\text{ mA}$
3. $I = 5\text{ V}/2.2\text{ k}\Omega = 2.27\text{ mA}$
4. $I = 15\text{ V}/4.7\text{ M}\Omega = 3.19\ \mu\text{A}$
5. $I = 20\text{ kV}/4.7\text{ M}\Omega = 4.26\text{ mA}$
6. $I = 10\text{ kV}/2.2\text{ k}\Omega = 4.55\text{ A}$

SECCIÓN 3–3 Cálculo del voltaje

1. $V = (1\text{ A})(10\ \Omega) = 10\text{ V}$
2. $V = (8\text{ A})(470\ \Omega) = 3.76\text{ kV}$
3. $V = (3\text{ mA})(100\ \Omega) = 300\text{ mV}$
4. $V = (25\ \mu\text{A})(56\ \Omega) = 1.4\text{ mV}$
5. $V = (2\text{ mA})(1.8\text{ k}\Omega) = 3.6\text{ V}$
6. $V = (5\text{ mA})(100\text{ M}\Omega) = 500\text{ kV}$
7. $V = (10\ \mu\text{A})(2.2\text{ M}\Omega) = 22\text{ V}$
8. $V = (100\text{ mA})(4.7\text{ k}\Omega) = 470\text{ V}$
9. $V = (3\text{ mA})(3.3\text{ k}\Omega) = 9.9\text{ V}$
10. $V = (2\text{ A})(6.8\ \Omega) = 13.6\text{ V}$

SECCIÓN 3–4 Cálculo de la resistencia

1. $R = 10\text{ V}/2.13\text{ A} = 4.7\ \Omega$
2. $R = 270\text{ V}/10\text{ A} = 27\ \Omega$
3. $R = 20\text{ kV}/5.13\text{ A} = 3.9\text{ k}\Omega$
4. $R = 15\text{ V}/2.68\text{ mA} = 5.6\text{ k}\Omega$
5. $R = 5\text{ V}/2.27\ \mu\text{A} = 2.2\text{ M}\Omega$
6. $R = 25\text{ V}/53.2\text{ mA} = 0.47\text{ k}\Omega = 470\ \Omega$

SECCIÓN 3–5 Introducción a la localización de fallas

1. Análisis, planificación y medición.
2. La división a la mitad identifica la falla aislando sucesivamente al mitad del circuito restante.
3. El voltaje se mide a través de un componente; la corriente se mide en serie con el componente.

Una aplicación de circuito

1. Con los nuevos resistores, $R = V/I$.

2. $I = 4\text{ V}/10\ \Omega = 400\text{ mA}$; $I = 4\text{ V}/100\ \Omega = 40\text{ mA}$; $I = 4\text{ V}/1.0\text{ k}\Omega = 4\text{ mA}$;
$I = 4\text{ V}/10\text{ k}\Omega = 400\ \mu\text{A}$; $I = 4\text{ V}/100\text{ k}\Omega = 40\ \mu\text{A}$; $I = 4\text{ V}/1.0\text{ M}\Omega = 4\ \mu\text{A}$.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

3–1 Sí
3–2 0 V
3–3 3.03 A
3–4 0.005 A
3–5 0.005 A
3–6 13.6 mA
3–7 21.3 μA
3–8 2.66 μA
3–9 37.0 mA
3–10 1.47 mA
3–11 1200 V
3–12 49.5 mV
3–13 0.150 mV
3–14 82.5 V
3–15 1755 V
3–16 2.20 Ω
3–17 68.2 kΩ
3–18 3.30 MΩ

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (c) **3.** (b) **4.** (d) **5.** (a) **6.** (d) **7.** (b) **8.** (d)
9. (c) **10.** (b)

EXAMEN RÁPIDO

1. (a) **2.** (b) **3.** (a) **4.** (c) **5.** (a) **6.** (b) **7.** (b) **8.** (c)
9. (b) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (a) **13.** (c) **14.** (b) **15.** (c)

ENERGÍA Y POTENCIA

4

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

4–1 Energía y potencia
4–2 Potencia en un circuito eléctrico
4–3 Potencia nominal en resistores
4–4 Conversión de energía y caída de voltaje en una resistencia
4–5 Fuentes de potencia
Una aplicación de circuito

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Definir los términos *energía* y *potencia*
- Calcular la potencia en un circuito
- Seleccionar adecuadamente resistores con base en consideraciones de potencia
- Explicar la conversión de energía y la caída de voltaje
- Analizar las fuentes de potencia y sus características

TÉRMINOS CLAVE

- Caída de voltaje
- Eficiencia
- Energía
- Fuente de potencia
- Joule (J)
- Kilowatt-hora
- Potencia
- Rendimiento Ampere-hora
- Watt (W)

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación se verá cómo la teoría aprendida en este capítulo es aplicable a la caja de resistencias introducida en el capítulo anterior. Se supondrá que la caja de resistencias tiene que ser utilizada para probar un circuito en el cual habrá un máximo de 4 V a través de todos los resistores. Usted evaluará la clasificación de potencia de cada resistor y, si no es suficiente, reemplazará el resistor con uno que tenga la adecuada capacidad de potencia.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 3, usted aprendió la relación de corriente, voltaje y resistencia tal como lo establece la ley de Ohm. La existencia de estas tres cantidades en un circuito eléctrico da por resultado la cuarta cantidad básica conocida como potencia. Existe una relación específica entre potencia e *I, V* y *R*.

Energía es la capacidad de realizar trabajo, y potencia es la velocidad a la cual se utiliza la energía. La corriente transporta energía eléctrica a través de un circuito. A medida que los electrones libres pasan por la resistencia del circuito, ceden su energía cuando chocan con átomos presentes en el material resistivo. La energía eléctrica cedida por los electrones se convierte en energía calorífica. La razón de cambio a la cual se utiliza la energía eléctrica es la potencia que hay en el circuito.

4–1 Energía y potencia

Cuando existe corriente a través de una resistencia, la energía eléctrica se transforma en calor o en otra forma de energía, como energía luminosa. Un ejemplo común de esto es un foco que se calienta demasiado como para tocarlo. La corriente a través del filamento que produce luz también produce un calentamiento indeseado porque el filamento tiene resistencia. Los componentes eléctricos deben ser capaces de disipar cierta cantidad de energía en un periodo determinado.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Definir *energía* y *potencia***
  - Expresar la potencia en función de la energía
  - Enunciar la unidad de potencia
  - Enunciar las unidades comunes de energía
  - Realizar cálculos de energía y potencia

Energía es la capacidad de realizar trabajo, y potencia es la razón de cambio a la cual se utiliza la energía.

Potencia (P) es cierta cantidad de energía (W) utilizada en cierto tiempo (t) y expresada como sigue:

Ecuación 4–1

$$P = \frac{W}{t}$$

donde: P = potencia en watts (W)

W = energía en joules (J)

t = tiempo en segundos (s)

BIOGRAFÍA



James Watt
1736–1819

Watt fue un inventor escocés y adquirió renombre por sus mejoras al motor de vapor, las cuales lo volvieron práctico para uso industrial. Watt patentó varios inventos, incluido el motor rotatorio. La unidad de potencia fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Biblioteca del Congreso estadounidense.)

Advierta que la W cursiva se utiliza para representar energía en la forma de trabajo y una W no cursiva representa watts, la unidad de potencia. El **joule (J)** es la unidad SI de energía.

La energía en joules dividida entre el tiempo en segundos da potencia en watts. Por ejemplo, si se utilizan 50 J de energía en 2 s, la potencia es de 50 J/2 s = 25 W. Por definición,

Un watt (W) es la cantidad de potencia cuando se utiliza un joule en un segundo.

Por tanto, el número de joules utilizados en un segundo siempre es igual al número de watts. Por ejemplo, si se utilizan 75 J en 1 s, la potencia es $P = W/t$ = 75 J/1 s = 75 W.

Cantidades de energía mucho menores que un watt son comunes en ciertas áreas de la electrónica. De igual forma que con valores pequeños de corriente y voltaje, se utilizan prefijos métricos para designar pequeñas cantidades de potencia. Por tanto, en algunas aplicaciones comúnmente se encuentran miliwatts (mW), microwatts (μW), e incluso picowatts (pW).

En el campo de las compañías eléctricas, los kilowatts (kW) y megawatts (MW) son unidades comunes. Las estaciones de radio y televisión también utilizan grandes cantidades de potencia para transmitir señales. Los motores eléctricos se clasifican comúnmente en caballos de fuerza (hp), donde 1 hp = 746 W.

Dado que potencia es la razón de cambio a la cual se utiliza la energía, tal como se expresa en la ecuación 4-1, la potencia utilizada en un periodo representa el consumo de energía. Si se multiplica la potencia en watts por el tiempo en segundos, se tiene energía en joules, simbolizada mediante W.

$$W = Pt$$

EJEMPLO 4–1 Se utiliza una cantidad de energía igual a 100 J en 5 s. ¿Cuál es la potencia en watts?

Solución

$$P = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} = \frac{W}{t} = \frac{100\text{ J}}{5\text{ s}} = \mathbf{20\ W}$$

*Problema relacionado** Si 100 W de potencia ocurren durante 30 s, ¿cuánta energía, en joules, se utilizó?

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 4–2 Exprese los siguientes valores de potencia eléctrica mediante prefijos métricos apropiados:

(a) 0.045 W **(b)** 0.000012 W **(c)** 3500 W **(d)** 10,000,000 W

Solución

(a) 0.045 W = **45 mW** **(b)** 0.000012 W = **12 μW**

(c) 3500 W = **3.5 kW** **(d)** 10,000,000 W = **10 MW**

Problema relacionado Exprese las siguientes cantidades de potencia en watts sin prefijos métricos:

(a) 1 mW **(b)** 1800 μW **(c)** 1000 mW **(d)** 1 μW

La unidad de energía kilowatt-hora (kWh)

El joule ha sido definido como una unidad de energía. Sin embargo, existe otra forma de expresar la energía. Dado que la potencia se expresa en watts y el tiempo en segundos, se pueden utilizar unidades de energía llamadas watt-segundo (Ws), watt-hora (Wh), y kilowatt-hora (kWh).

Cuando paga su recibo de electricidad, le cobran con base en la cantidad de energía que utiliza, no la potencia. Como las compañías de electricidad comercian con enormes cantidades de energía, la unidad más práctica resulta ser el **kilowatt-hora**. Se cosume un kilowatt-hora de energía cuando se utilizan mil watts durante una hora. Por ejemplo, un foco de 100 W que permanezca encendido durante 10 h consume 1 kWh de energía.

$$W = Pt = (100\text{ W})(10\text{ h}) = 1000\text{ Wh} = 1\text{ kWh}$$

BIOGRAFÍA



James Prescott Joule 1818–1889

Joule, un físico británico, es conocido por su trabajo de investigación en electricidad y termodinámica. Formuló la relación que establece que la cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica en un conductor es proporcional a la resistencia de éste y el tiempo. La unidad de energía fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Biblioteca del Congreso estadounidense.)

EJEMPLO 4–3 Determine el número de kilowatts-hora (kWh) para cada uno de los siguientes consumos de energía:

(a) 1400 W durante 1 h **(b)** 2500 W durante 2 h
(c) 100,000 W durante 5 h

Solución

(a) 1400 W = 1.4 kW
$W = Pt = (1.4\text{ kW})(1\text{ h}) = \mathbf{1.4\ kWh}$

(b) 2500 W = 2.5 kW
$W = (2.5\text{ kW})(2\text{ h}) = \mathbf{5\ kWh}$

(c) 100,000 W = 100 kW
$W = (100\text{ kW})(5\text{ h}) = \mathbf{500\ kWh}$

Problema relacionado ¿Cuántos kilowatts-hora son utilizados por un foco de 250 W encendido durante 8 h?

REPASO DE LA SECCIÓN 4-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Defina el término *potencia*.
2. Escriba la fórmula para potencia en función de energía y tiempo.
3. Defina el término *watt*.
4. Exprese cada uno de los siguientes valores de potencia en las unidades más apropiadas:
   (a) 68,000 W **(b)** 0.005 W **(c)** 0.000025 W
5. Si usted utiliza 100 W de potencia durante 10 h, ¿cuánta energía (en kWh) utiliza?
6. Convierta 2000 Wh en kilowatts-hora.
7. Convierta 360,000 Ws en kilowatts-hora.

4–2 POTENCIA EN UN CIRCUITO ELÉCTRICO

En un circuito eléctrico la generación de calor, que ocurre cuando la energía eléctrica se transforma en energía calorífica, con frecuencia es un subproducto indeseable generado por el paso de la corriente a través de la resistencia presente en el circuito. En algunos casos, sin embargo, la generación de calor es el propósito primordial de un circuito como, por ejemplo, en un calentador resistivo eléctrico. En todo caso, en circuitos eléctricos y electrónicos a menudo hay que tratar con potencia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Calcular potencia en un circuito**
  - Determinar potencia cuando se conocen los valores de I y R
  - Determinar la potencia cuando se conocen los valores de V e I
  - Determinar la potencia cuando se conocen los valores de V y R

Cuando circula corriente a través de una resistencia, las colisiones de los electrones producen calor a consecuencia de la conversión de la energía eléctrica, tal como se indica en la figura 4-1. En un circuito eléctrico, la cantidad de potencia disipada depende de la cantidad de resistencia y de corriente, lo cual se expresa como sigue:

Ecuación 4–2

$$P = I^2R$$

donde: P = potencia en watts (W)
I = corriente en amperes (A)
R = resistencia en ohms (Ω)

Una expresión equivalente para potencia se obtiene, en función de voltaje y corriente, sustituyendo IR por V (I^2 es $I \times I$).

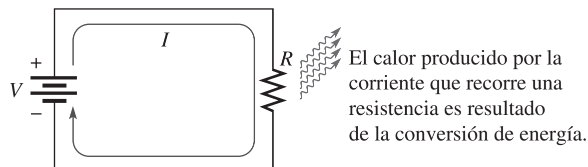
$$P = I^2R = (I \times I)R = I(IR) = (IR)I$$

Ecuación 4–3

$$P = VI$$

▶ **FIGURA 4–1**

La disipación de energía en un circuito eléctrico produce energía calorífica disipada por la resistencia.



donde P está en watts cuando V está en volts e I está en amperes. Sustituyendo I por V/R (ley de Ohm) se obtiene otra expresión equivalente.

$$P = VI = V\left(\frac{V}{R}\right)$$

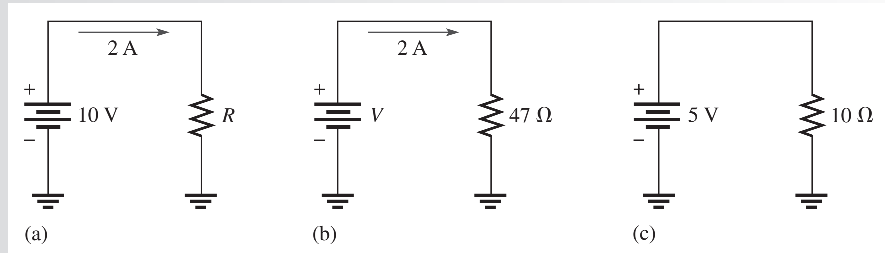
$$P = \frac{V^2}{R}$$

Ecuación 4–4

La relación entre potencia y corriente, voltaje, y resistencia expresada en las fórmulas precedentes se conoce como **ley de Watt**. En cada caso, I debe estar en amperes, V en volts y R en ohms. Para calcular la potencia en una resistencia, se puede utilizar cualquiera de las tres fórmulas de potencia, según la información que se tenga. Por ejemplo, suponga que se conocen los valores de corriente y voltaje. En este caso, la potencia se calcula con la fórmula $P = VI$. Si se conocen I y R, se utiliza la fórmula $P = I^2R$. Si V y R son los valores conocidos, se utiliza la fórmula $P = V^2/R$.

EJEMPLO 4–4 Calcule la potencia en cada uno de los tres circuitos de la figura 4-2.

▶ **FIGURA 4–2**



Solución En el circuito (a), se conocen V e I. Por consiguiente, use la ecuación 4-3.

$$P = VI = (10\text{ V})(2\text{ A}) = \mathbf{20\ W}$$

En el circuito (b), se conocen I y R. Por consiguiente, use la ecuación 4-2.

$$P = I^2R = (2\text{ A})^2(47\ \Omega) = \mathbf{188\ W}$$

En el circuito (c), se conocen V y R. Por consiguiente, use la ecuación 4-4.

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(5\text{ V})^2}{10\ \Omega} = \mathbf{2.5\ W}$$

Problema relacionado Determine P en cada uno de los circuitos de la figura 4-2 con los siguientes cambios:

Circuito (a): I duplicada y V sin cambios

Circuito (b): R duplicada e I sin cambios

Circuito (c): V reducido a la mitad y R sin cambios

EJEMPLO 4–5 Un foco de 100 W opera con 120 V. ¿Cuánta corriente requiere?

Solución Use la fórmula $P = VI$ y resuelva para I transponiendo primero los términos para tener I en el lado izquierdo de la ecuación.

$$VI = P$$

Reacomodando

$$I = \frac{P}{V}$$

Sustituyendo P por 100 W y V por 120 V se obtiene

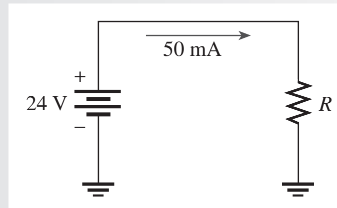
$$I = \frac{P}{V} = \frac{100\text{ W}}{120\text{ V}} = 0.833\text{ A} = \mathbf{833\text{ mA}}$$

Problema relacionado Un foco absorbe 545 mA de una fuente de 110 V. ¿Cuál es la potencia disipada?

REPASO DE LA SECCIÓN 4-2

1. Si el voltaje a través de cierto resistor es de 10 V y por este resistor circula una corriente de 3 A, ¿cuál es la potencia disipada?
2. ¿Cuánta potencia genera la fuente de la figura 4-3? ¿Cuál es la potencia en el resistor? ¿Son iguales los dos valores? ¿Por qué?

▶ FIGURA 4–3



3. Si a través de un resistor de 56 Ω circula una corriente de 5 A, ¿cuál es la potencia disipada?
4. ¿Cuánta potencia es disipada por 20 mA a través de un resistor de 4.7 kΩ?
5. Se aplican cinco volts a un resistor de 10 Ω. ¿Cuál es la potencia disipada?
6. ¿Cuánta potencia disipa un resistor de 2.2 kΩ con 8 V a través de él?
7. ¿Cuál es la resistencia de un foco de 75 W que requiere de 0.5 A?

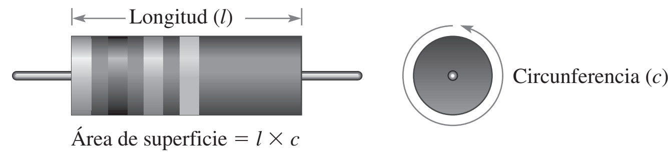
4–3 POTENCIA NOMINAL EN RESISTORES

Como se sabe, el resistor disipa calor cuando a través de él circula una corriente. El límite de la cantidad de calor que un resistor puede disipar está especificado por su potencia nominal.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Seleccionar resistores apropiadamente con base en consideraciones de potencia**
  - Definir el *termino potencia nominal*
  - Explicar cómo las características físicas de los resistores determinan su potencia nominal
  - Verificar una falla en un resistor con la ayuda de un ohmmetro

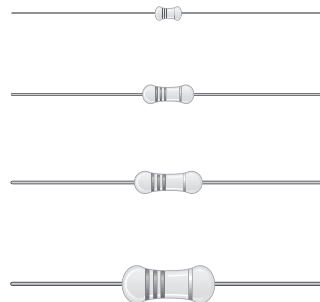
La **potencia nominal** es la cantidad máxima de potencia que un resistor puede disipar sin que sufra daños por calentamiento excesivo. La potencia nominal no está relacionada con el valor óhmico (resistencia), sino más bien está determinada principalmente por la composición física, el tamaño y la forma del resistor. Si todas las características anteriores son iguales, mientras más grande es el área superficial de un resistor más potencia puede disipar. *El área superficial de un resistor cilíndrico es igual a la longitud (l) por la circunferencia (c)*, tal como indica la figura 4-4. El área de los extremos no se muestra.



◀ **FIGURA 4–4**

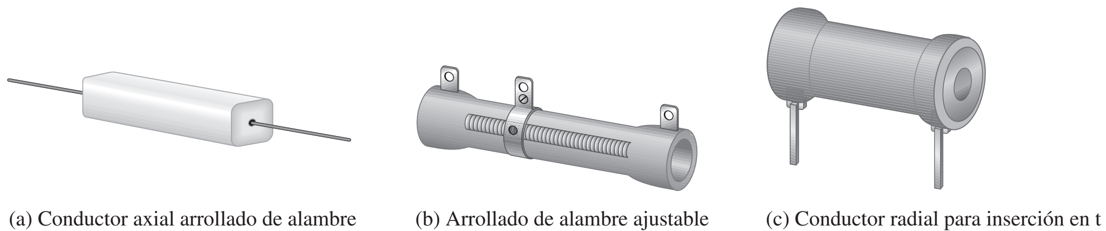
La potencia nominal de un resistor está directamente relacionada con su área de superficie.

Resistores de película metálica están disponibles en capacidades de potencia estándar desde ⅛ W hasta 1 W, como se muestra en la figura 4-5. Las potencias nominales disponibles para otros tipos de resistores varían. Por ejemplo, los resistores devanados de alambre tienen clasificaciones hasta de 225 W o más grandes. La figura 4-6 muestra algunos de estos resistores.



◀ **FIGURA 4–5**

Tamaños relativos de resistores de película metálica con clasificaciones de potencia estándar de ⅛ W, ¼ W, ½ W y 1 W.



(a) Conductor axial arrollado de alambre (b) Arrollado de alambre ajustable (c) Conductor radial para inserción en t

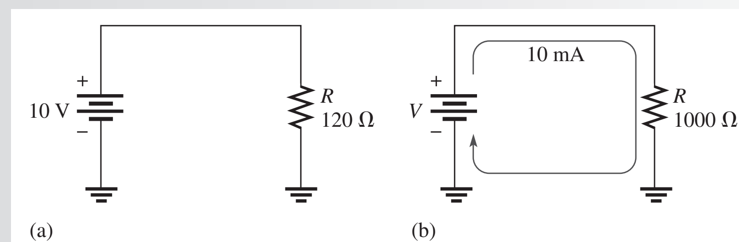
▲ **FIGURA 4–6**

Resistores típicos con altas potencias nominales.

Cuando se utiliza un resistor en un circuito, su potencia nominal debe ser mayor que la potencia máxima que deberá manejar. Por ejemplo, si un resistor tiene que disipar 0.75 W en una aplicación de circuito, su capacidad debe ser de por lo menos el siguiente valor estándar más alto, en este caso 1 W. *Se deberá utilizar una potencia nominal más grande que la potencia existente siempre que sea posible, como un margen de seguridad.*

EJEMPLO 4–6 Elija la potencia nominal adecuada adecuada para cada uno de los resistores de película de metal mostrados en la figura 4-7 (⅛ W, ¼ W, ½ W, o 1 W).

▶ **FIGURA 4–7**



Solución En la figura 4-7(a), la potencia existente es

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(10\ \text{V})^2}{120\ \Omega} = \frac{100\ \text{V}^2}{120\ \Omega} = 0.833\ \text{W}$$

Seleccione un resistor con una potencia nominal más alta que la existente. En este caso, se deberá utilizar un resistor de 1 W.

En la figura 4-7(b), la potencia existente es

$$P = I^2R = (10\ \text{mA})^2(1000\ \Omega) = (10 \times 10^{-3}\ \text{A})^2(1000\ \Omega) = 0.1\ \text{W}$$

En este caso debe ser usado un **resistor** de al menos **⅛ W (0.125 W)**.

Problema relacionado Se requiere cierto resistor para disipar 0.25 W. ¿Qué potencia nominal estándar se deberá utilizar?

Cuando en un resistor la potencia de operación es mayor que su potencia nominal, el resistor se calentará en exceso. Por consiguiente, o el resistor se quemará o su valor de resistencia se alterará mucho.

NOTA DE SEGURIDAD

Los resistores pueden calentarse en exceso durante su operación normal. Para evitar quemaduras, no toque un componente de circuito mientras la energía esté conectada al circuito. Una vez que la energía haya sido cortada, deje pasar un poco de tiempo para que el componente se enfríe.

Un resistor que ha sufrido daño por sobrecalentamiento con frecuencia puede ser detectado por la apariencia chamuscada o alterada de su superficie. Si no hay evidencia visual, cuando se sospeche que un resistor está dañado puede verificarse con un ohmmetro para ver si está abierto o si su valor de resistencia es incorrecto. Recuerde que uno o ambos conectores de un resistor deberán ser desconectados de un circuito para medir su resistencia.

Verificación de un resistor con un ohmmetro

En las figuras 4-8(a) y 4-8(b) se muestran un multímetro digital y un multímetro analógico típicos. En el medidor digital mostrado en la figura 4-8(a), se utiliza el interruptor de función redondo para seleccionar ohms (Ω). No se tiene que seleccionar manualmente un intervalo porque este medidor en particular lo elige automáticamente y da una lectura digital directa del valor de resistencia. En el medidor analógico, el gran interruptor redondo se llama *interruptor de intervalo*. Advierta los ajustes de resistencia (OHMS) en ambos medidores.

En el medidor analógico de la parte (b), cada ajuste indica la cantidad por la cual tiene que ser multiplicada la escala de ohms (escala superior) del medidor. Por ejemplo, si la manecilla marca

▶ FIGURA 4–8

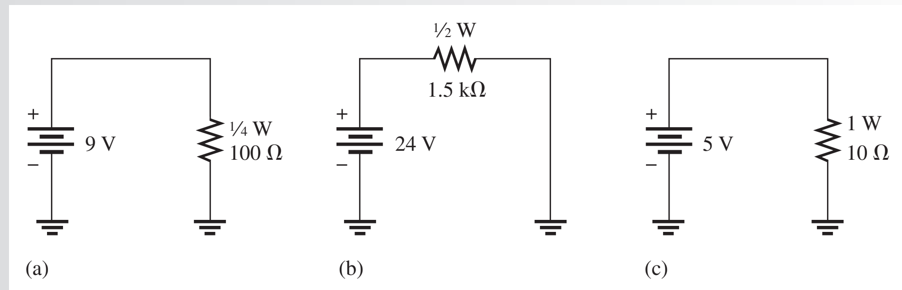
Multímetros portátiles típicos. (a) Cortesía de Fluke Corporation. Reproducido con permiso. (b) Cortesía de B+K Precision.



(a) Multímetro digital (b) Multímetro analógico

50 en la escala de ohms y el interruptor de intervalo está en ×10, la resistencia que se está midiendo es de 50 × 10 Ω = 500 Ω. *Si el resistor está abierto, la manecilla permanecerá totalmente a la izquierda (∞ significa infinito) sin importar el ajuste del interruptor de intervalo.*

EJEMPLO 4–7 Determine si en cada uno de los circuitos de la figura 4-9 posiblemente el resistor ha sido dañado por sobrecalentamiento.



▲ **FIGURA 4–9**

Solución En el circuito de la figura 4-9(a).

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(9\text{ V})^2}{100\ \Omega} = 0.810\text{ W} = 810\text{ mW}$$

La potencia nominal del resistor es de ¼ W (0.25 W), lo cual es insuficiente para manejar la potencia. Esto implica que el resistor se sobrecalentó y puede quemarse y abrirse.

En el circuito de la figura 4-9(b),

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(24\text{ V})^2}{1.5\text{ k}\Omega} = 0.384\text{ W} = 384\text{ mW}$$

La potencia nominal del resistor es de 1/2 W (0.5 W), la cual es suficiente para manejar la potencia.

En el circuito de la figura 4-9(c),

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(5\text{ V})^2}{10\ \Omega} = 2.5\text{ W}$$

La potencia nominal del resistor es de 1 W, la cual es insuficiente para manejar la potencia. El resistor se sobrecalentó y puede quemarse y abrirse.

Problema relacionado Se conecta un resistor de 0.25 W, 1.0 kΩ a través de una batería de 12 V. ¿Es adecuada la potencia nominal?

REPASO DE LA SECCIÓN 4-3

1. Nombre dos valores importantes asociados con un resistor.
2. ¿Cómo determina el tamaño físico de un resistor la cantidad de potencia que éste puede manejar?
3. Enumere las potencias nominales estándar de resistores de película metálica.
4. Un resistor debe manejar 0.3 W. ¿Cuál es la potencia nominal mínima de un resistor de película metálica que deberá ser utilizado para disipar apropiadamente la energía?

4–4 Conversión de energía y caída de voltaje en una resistencia

Como ya se aprendió, cuando circula corriente por una resistencia, la energía eléctrica se convierte en energía calorífica. Este calor es provocado por colisiones de los electrones libres que están dentro de la estructura atómica del material resistivo. Cuando ocurre una colisión, se disipa calor; y los electrones ceden algo de su energía adquirida conforme se mueven por todo el material.

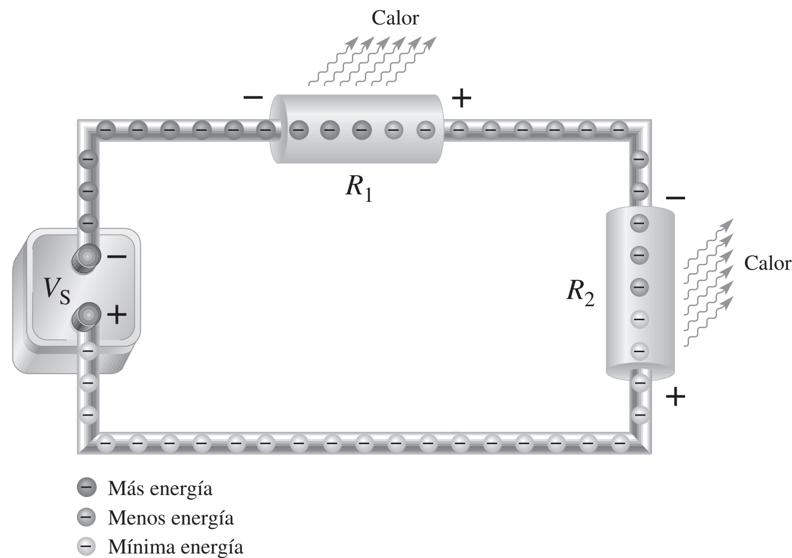
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar la conversión de energía y la caída de voltaje**
  - Analizar la causa de la conversión de energía en un circuito
  - Definir el término *caída de voltaje*
  - Explicar la relación entre conversión de energía y caída de voltaje

La figura 4-10 ilustra la carga en la forma de electrones que fluyen desde la terminal negativa de una batería, a través de un circuito, hasta la terminal positiva. Conforme emergen de la terminal negativa, los electrones se encuentran en su nivel de energía más alto. Los electrones fluyen por cada uno de los resistores que están conectados para formar una trayectoria para la corriente (este tipo de conexión se llama conexión en serie, como se aprenderá en el capítulo 5). A medida que los electrones fluyen por cada resistor, ceden algo de su energía en forma de calor. Por consiguiente, los electrones tienen más energía cuando entran a un resistor que cuando salen de él, tal como se ilustra en la figura mediante la disminución de la intensidad del tono. Cuando los electrones han recorrido el circuito y regresan a la terminal positiva de la batería, están en su nivel de energía más bajo.

▶ **FIGURA 4–10**

Una pérdida de energía provocada por los electrones (carga) que fluyen por una resistencia crea una caída de voltaje porque éste es igual a energía dividida entre carga.



Recuerde que voltaje es igual a energía por carga ($V = W/Q$), y la carga es una propiedad de los electrones. Con base en el voltaje de la batería, cierta cantidad de energía es impartida a todos los electrones que salen de la terminal negativa. Igual cantidad de electrones fluye en cada punto por todo el circuito, pero su energía disminuye a medida que se mueven a través de la resistencia del circuito.

En la figura 4-10, el voltaje en el extremo izquierdo de R_1 es igual a $W_{entrante}/Q$, y el voltaje en el extremo derecho de R_1 es igual a $W_{saliente}/Q$. La misma cantidad de electrones que entra a R_1 también sale de R_1, por lo cual Q es constante. Sin embargo, la energía $W_{saliente}$ es menor que

$W_{entrante}$, de modo que el voltaje en el extremo derecho de R_1 es menor que en el extremo izquierdo. Esta disminución del voltaje a través del resistor provocada por una pérdida de energía se llama **caída de voltaje**. El voltaje presente en el extremo derecho de R_1 es menos negativo (o más positivo) que en el extremo izquierdo. La caída de voltaje se indica mediante signos $-$ y $+$ (el signo $+$ implica un voltaje menos negativo o más positivo).

Los electrones han perdido algo de energía en R_1 y ahora entran a R_2 con un nivel de energía reducido. Al fluir a través de R_2, pierden más energía, lo que provoca otra caída de voltaje a través de R_2.

REPASO DE LA SECCIÓN 4-4

1. **¿Cuál es la razón básica de la conversión de energía en un resistor?**
2. **¿Qué es una caída de voltaje?**
3. **¿Cuál es la polaridad de una caída de voltaje en relación con la dirección convencional de la corriente?**

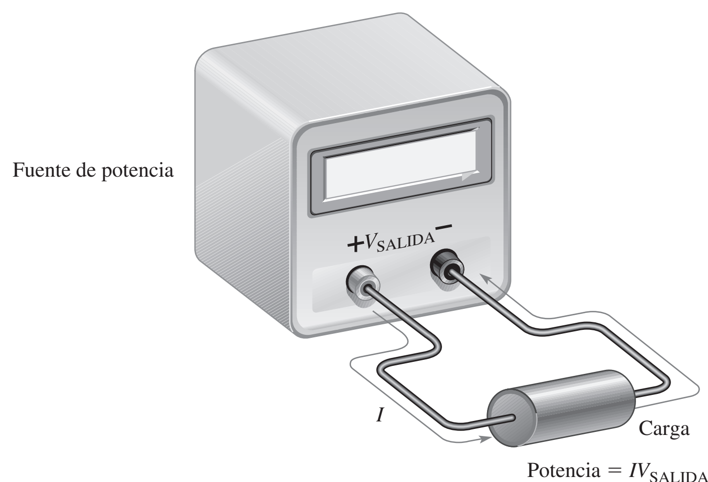
4–5 FUENTES DE POTENCIA

En general, una **fuente de potencia** es un dispositivo que suministra potencia a una carga. Recuerde que una carga es cualquier dispositivo eléctrico o circuito que está conectado a la salida de la fuente de potencia y absorbe energía de ésta.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar las fuentes de potencia y sus características**
  - Definir el término *amperes-hora* nominales de baterías
  - Examinar la eficiencia de una fuente electrónica de potencia

La figura 4-11 muestra una representación de una fuente de potencia con un dispositivo de carga conectado a ella. La carga puede ser cualquier cosa desde un foco hasta una computadora. La fuente de potencia produce un voltaje a través de sus dos terminales de salida y suministra corriente a través de la carga, como indica la figura. El producto IV_{SALIDA} es la cantidad de potencia producida por la fuente y consumida por la carga. Para un voltaje de salida dado (V_{SALIDA}), más corriente absorbida por la carga significa más potencia de la fuente.



◀ **FIGURA 4–11**

Fuente de potencia y carga.

Las fuentes de potencia van desde baterías simples hasta circuitos electrónicos regulados donde un voltaje de salida exacto es automáticamente mantenido. Una batería es una fuente de potencia de cd que convierte energía química en energía eléctrica. Las fuentes electrónicas de potencia normalmente convierten los 110 V de ca (corriente alterna) de una toma de corriente de pared en voltaje de cd regulado (corriente directa) a un nivel adecuado para componentes electrónicos.

Amperes-hora nominales de baterías

Las baterías convierten energía química en energía eléctrica. A causa de su limitada fuente de energía química, las baterías tienen cierta capacidad que limita la cantidad de tiempo durante el que pueden producir un nivel de potencia dado. Esta capacidad se mide en amperes-hora. Los **amperes-hora nominales** determinan el tiempo durante el cual una batería puede suministrar cierta cantidad de corriente promedio hacia una carga a voltaje nominal.

Los ampere-hora nominales significan que la batería puede suministrar un promedio de un ampere de corriente hacia una carga durante una hora con la salida de voltaje nominal. Esta misma batería puede suministrar un promedio de dos amperes durante media hora. Mientras más corriente debe suministrar la batería, más corta es su duración. En la práctica, una batería se evalúa casi siempre para un nivel de corriente y voltaje de salida específicos. Por ejemplo, la batería automotriz de 12 V puede ser evaluada para 70 Ah a 3.5 A. Esto significa que puede producir un promedio de 3.5 A durante 20 horas al voltaje nominal.

EJEMPLO 4–8 ¿Durante cuántas horas puede una batería suministrar 2 A si su capacidad es de 70 Ah?

Solución La clasificación de amperes-hora es la corriente por el número de horas (x).

$$70 \text{ Ah} = (2 \text{ A})(x \text{ h})$$

Resolviendo para el número de horas, x, se obtiene

$$x = \frac{70 \text{ Ah}}{2 \text{ A}} = \mathbf{35\ h}$$

Problema relacionado Cierta batería suministra 10 A durante 6 h. ¿Cuál es su capacidad en Ah?

Eficiencia de una fuente de potencia

Una importante característica de las fuentes electrónicas de potencia es su eficiencia. **Eficiencia** es la relación de la potencia de salida suministrada a una carga respecto de potencia de entrada al circuito.

Ecuación 4–5

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{\text{SALIDA}}}{P_{\text{ENTRADA}}}$$

La eficiencia a menudo de expresa como un porcentaje. Por ejemplo, si la potencia de entrada es de 100 W y la potencia de salida es de 50 W, la eficiencia es (50 W/100 W) $\times$ 100% = 50%.

Todas las fuentes electrónicas de potencia requieren que se les suministre energía. Por ejemplo, una fuente electrónica de potencia utiliza, generalmente, la potencia de ca de una toma de corriente de pared como su entrada. Su salida casi siempre es voltaje de cd regulado. La potencia de salida *siempre* es menor que la de entrada porque una parte de la potencia total debe ser utilizada internamente para operar los circuitos de la fuente de potencia. A esta disipación de potencia interna se le llama normalmente *pérdida de potencia*. La potencia de salida es la potencia de entrada menos la pérdida de potencia.

Ecuación 4–6

$$P_{\text{SALIDA}} = P_{\text{ENTRADA}} - P_{\text{PÉRDIDA}}$$

Alta eficiencia significa que en la fuente de potencia se disipa muy poca potencia, y que existe una proporción más alta de potencia de salida con determinada potencia de entrada.

EJEMPLO 4–9 Cierta fuente electrónica de potencia requiere 25 W de potencia de entrada. Puede producir una potencia de salida de 20 W. ¿Cuál es su eficiencia y cuál es la pérdida de potencia?

Solución

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{\text{SALIDA}}}{P_{\text{ENTRADA}}} = \frac{20\text{ W}}{25\text{ W}} = \mathbf{0.8}$$

Expresada como porcentaje,

$$\text{Eficiencia} = \left(\frac{20\text{ W}}{25\text{ W}}\right)100\% = 80\%$$

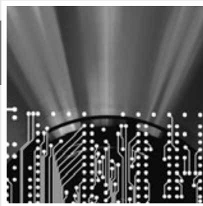
La pérdida de potencia es

$$P_{\text{PÉRDIDA}} = P_{\text{ENTRADA}} - P_{\text{SALIDA}} = 25\text{ W} - 20\text{ W} = \mathbf{5\ W}$$

Problema relacionado La eficiencia de una fuente de potencia es del 92%. Si P_{ENTRADA} es de 50 W, ¿de cuánto es la P_{SALIDA}?

REPASO DE LA SECCIÓN 4-5

1. Cuando un dispositivo de carga absorbe una cantidad mayor de corriente de una fuente de potencia, ¿este cambio representa una carga mayor o menor para la fuente?
2. Una fuente de potencia produce un voltaje de salida de 10 V. Si la fuente proporciona 0.5 A a una carga, ¿cuál es la potencia suministrada dicha carga?
3. Si la potencia nominal en amperes-hora de una batería es de 100 Ah, ¿cuánto tiempo puede suministrar 5 A a una carga?
4. Si la batería de la pregunta 3 es de 12 V, ¿qué potencia entrega a una carga con el valor de corriente especificado?
5. Una fuente electrónica de potencia utilizada en el laboratorio opera con una potencia de entrada de 1 W. Ésta puede suministrar una potencia de salida de 750 mW. ¿Cuál es su eficiencia? Determine la pérdida de potencia.



Una aplicación de circuito

En esta aplicación, la caja de resistencias modificada en el capítulo 3 está de regreso. La última vez, usted comprobó que todos los valores de los resistores fueran correctos. En esta ocasión debe asegurarse que cada resistor tenga una potencia nominal suficiente; y si ésta es insuficiente, reemplace el resistor con uno adecuado.

Potencia nominal

Suponga que la potencia nominal de cada resistor presente en la caja de resistencias, tal como se modificó en el capítulo 3, es de ⅛ W. La caja se muestra en la figura 4-12.

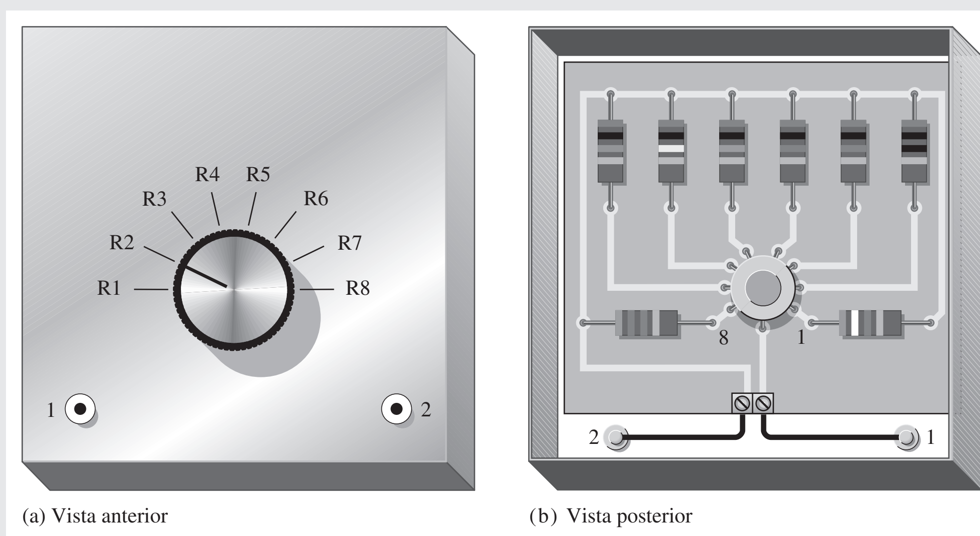
◆ Determine si la potencia nominal de cada resistor es adecuada para un máximo de 4 V

◆ Si una potencia nominal no es adecuada, determine la potencia nominal más baja requerida para manejar la potencia máxima. Elija de entre las siguientes potencias nominales estándar de ⅛ W, ¼ W, ½ W, 1 W, 2 W y 5 W.

◆ Agregue la potencia nominal de cada resistor al diagrama desarrollado en el capítulo 3.

Repaso

1. ¿Cuántos resistores fueron reemplazados a causa de potencias nominales inadecuadas?
2. Si la resistencia debe operar con un máximo de 10 V, ¿cuáles resistores deben ser cambiados y cuáles son sus potencias nominales mínimas?



(a) Vista anterior (b) Vista posterior

▲ FIGURA 4–12

RESUMEN

- La potencia nominal en watts de un resistor determina la potencia máxima que puede manejar con seguridad.
- Los resistores más grandes puede disipar más potencia en forma de calor que los resistores pequeños.
- Un resistor deberá tener una potencia nominal más grande que la potencia máxima esperada en el circuito.
- La potencia nominal no está relacionada con el valor de resistencia.
- Un resistor normalmente se abre cuando se sobrecalienta y entonces falla.
- Energía es la capacidad de realizar trabajo y es igual a la potencia multiplicada por el tiempo.
- El kilowatt-hora es la unidad de energía.
- Un kilowatt-hora es igual a mil watts utilizados durante una hora, o cualquier otra combinación de watts y horas que tenga un producto de uno.
- Una fuente de potencia es una fuente de energía utilizada para operar dispositivos eléctricos y electrónicos.
- Una batería es un tipo de fuente de potencia que convierte energía química en energía eléctrica.
- Una fuente electrónica de potencia convierte energía comercial (ca de la compañía de electricidad) en cd regulada con varios niveles de voltaje.
- La potencia de salida de una fuente es el voltaje de salida por la corriente suministrada a la carga.
- Una carga es un dispositivo que absorbe corriente de la fuente de potencia.
- La capacidad de una batería se mide en amperes-hora (Ah).
- Un ampere-hora es un ampere utilizado durante una hora, o cualquier otra combinación de amperes y horas cuyo producto sea uno.
- Un circuito con alta eficiencia sufre un porcentaje de pérdida de potencia más pequeño que un circuito con eficiencia más baja.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas utilizados en el capítulo se definen en el glosario incluido al final del libro.

Caída de voltaje Disminución de voltaje a través de un resistor provocada por una pérdida de energía.

Clasificación de amperes-hora (Ah) Número dado en amperes-hora y determinado al multiplicar la corriente (A) por el espacio de tiempo (h) que una batería puede suministrar corriente a una carga.

Eficiencia Relación de la potencia de salida suministrada a una carga a la potencia de entrada suministrada a un circuito; generalmente se expresa como un porcentaje.

Energía Capacidad de realizar trabajo.

Fuente de potencia Dispositivo que suministra potencia a una carga.

Joule (J) La unidad SI de energía.

Kilowatt-hora (kWh) Gran unidad de energía utilizada principalmente por las compañías de electricidad.

Potencia La razón de cambio de consumo de energía.

Watt (W) Es la unidad de potencia. Un watt es la potencia cuando se utiliza 1 J de energía en 1 s.

FÓRMULAS

4–1 $P = \frac{W}{t}$	La potencia es igual a la energía dividida entre el tiempo.
4–2 $P = I^2R$	La potencia es igual a la corriente al cuadrado por la resistencia.
4–3 $P = VI$	La potencia es igual al voltaje por la corriente.
4–4 $P = \frac{V^2}{R}$	La potencia es igual al voltaje al cuadrado dividido entre la resistencia.
4–5 $\text{Eficiencia} = \frac{P_{\text{ENTRADA}}}{P_{\text{SALIDA}}}$	Eficiencia de una fuente de potencia.
4–6 $P_{\text{SALIDA}} = P_{\text{ENTRADA}} - P_{\text{PÉRDIDA}}$	La potencia de salida es la potencia de entrada menos la pérdida de potencia.

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. La potencia se puede definir como
(a) energía **(b)** calor
(c) la razón de cambio a la cual se utiliza la energía **(d)** el tiempo requerido para utilizar la energía

2. Si se consumen doscientos joules de energía en 10 s. La potencia es
(a) 2000 W **(b)** 10 W **(c)** 20 W **(d)** 2 W

3. Si se requieren 300 ms para utilizar 10,000 J de energía, la potencia es
(a) 33.3 kW **(b)** 33.3 W **(c)** 33.3 mW

4. En 50 kW, hay
(a) 500 W **(b)** 5000 W **(c)** 0.5 MW **(d)** 50,000 W

5. En 0.045 W, hay
(a) 45 kW **(b)** 45 mW **(c)** 4,500 μW **(d)** 0.00045 MW

6. Con 10 V y 50 mA, la potencia es
(a) 500 mW **(b)** 0.5 W **(c)** 500,000 μW **(d)** respuestas (a), (b) y (c)

7. Cuando la corriente a través de un resistor de 10 kΩ es de 10 mA, la potencia es
(a) 1 W **(b)** 10 W **(c)** 100 mW **(d)** 1000 μW

8. Un resistor de 2.2 kΩ disipa 0.5 W. La corriente es
(a) 15.1 mA **(b)** 0.227 mA **(c)** 1.1 mA **(d)** 4.4 mA

9. Un resistor de 330 Ω disipa 2 W. El voltaje es
(a) 2.57 V **(b)** 660 V **(c)** 6.6 V **(d)** 25.7 V

10. Si utiliza 500 W de potencia durante 24 h, ha utilizado
(a) 0.5 kWh **(b)** 2400 kWh **(c)** 12,000 kWh **(d)** 12 kWh

11. ¿Cuántos watts-hora representan 75 W usados durante 10 h?
(a) 75 Wh **(b)** 750 Wh **(c)** 0.75 Wh **(d)** 7500 Wh

12. Un resistor de 100 Ω debe transportar una corriente máxima de 35 mA. Su capacidad deberá ser de por lo menos
(a) 35 W **(b)** 35 mW **(c)** 123 mW **(d)** 3500 mW

13. La potencia nominal de un resistor que ha de manejar hasta 1.1 W deberá ser
(**a**) 0.25 W (**b**) 1 W (**c**) 2 W (**d**) 5 W
14. Un resistor de 22 Ω y medio watt y un resistor de 220 Ω y medio watt se conectan a través de una fuente de 10 V. ¿Cuál o cuáles resistores se sobrecalentarán?
(**a**) 22 Ω (**b**) 220 Ω (**c**) ambos (**d**) ninguno
15. Cuando la manecilla de un ohmmetro analógico indica infinito, el resistor que se está midiendo está
(**a**) sobrecalentado (**b**) en cortocircuito (**c**) abierto (**d**) invertido
16. Se conecta una batería de 12 V a una carga de 600 Ω. En estas condiciones, su capacidad es de 50 Ah. ¿Cuánto tiempo puede suministrar corriente a la carga?
(**a**) 2500 h (**b**) 50 h (**c**) 25 h (**d**) 4.16 h
17. Una fuente de potencia dada es capaz de suministrar 8 A durante 2.5 h. Su capacidad de amperes-hora es
(**a**) 2.5 Ah (**b**) 20 Ah (**c**) 8 Ah
18. Una fuente de potencia produce una salida de 0.5 W con una entrada de 0.6 W. Su porcentaje de eficiencia es
(**a**) 50% (**b**) 60% (**c**) 83.3% (**d**) 45%

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Si la corriente a través de un resistor fijo cambia de 10 mA a 12 mA, la potencia en el resistor
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia
2. Si el voltaje a través de un resistor fijo cambia de 10 V a 7 V, la potencia en el resistor
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia
3. Un resistor variable tiene 5 V a través de él. Si usted reduce la resistencia, la potencia en el resistor
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia
4. Si el voltaje a través de un resistor se incrementa de 5 a 10 V y la corriente aumenta de 1 mA a 2 mA, la potencia
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia
5. Si la resistencia de una carga conectada a una batería se incrementa, la cantidad de tiempo que la batería puede suministrar corriente
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia
6. Si la cantidad de tiempo que una batería suministra corriente a una carga disminuye, su capacidad de amperes-hora.
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia
7. Si la corriente que una batería suministra a una carga se incrementa, la duración de la batería
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia
8. Si no hay una carga conectada a una batería, su capacidad de amperes-hora
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 4-11

9. Si el voltaje de salida de la fuente de potencia se incrementa, la potencia suministrada a la carga constante
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia
10. Con un voltaje constante de salida, si la corriente suministrada a la carga disminuye, la potencia suministrada a la carga
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia
11. Con un voltaje constante de salida, si la resistencia de la carga se incrementa, la potencia en la carga
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia
12. Si la carga se retira del circuito y deja una apertura, idealmente el voltaje de salida de la fuente de potencia
(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia

PROBLEMAS

Un asterisco (*) indica los problemas más difíciles.
Las respuestas a problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 4–1 Energía y potencia

1. Demuestre que la unidad de potencia (el watt) equivale a un volt por un ampere.

2. Demuestre que hay 3.6×10^6 joules en un kilowatt-hora.

3. ¿Cuál es la potencia cuando se consume energía a razón de 350 J/s?

4. Cuántos watts se utilizan cuando se consumen 7500 J de energía en 5 h?

5. ¿A cuántos watts equivalen 1000 J en 50 ms?

6. Convierta las siguientes cantidades en kilowatts:

(a) 1000 W **(b)** 3750 W **(c)** 160 W **(d)** 50,000 W

7. Convierta las siguientes cantidades en megawatts:

(a) 1,000,000 W **(b)** 3×10^6 W **(c)** 15×10^7 W **(d)** 8700 kW

8. Convierta las siguientes cantidades en miliwatts:

(a) 1 W **(b)** 0.4 W **(c)** 0.002 W **(d)** 0.0125 W

9. Convierta las siguientes cantidades en microwatts:

(a) 2 W **(b)** 0.0005 W **(c)** 0.25 mW **(d)** 0.00667 mW

10. Convierta las siguientes cantidades en watts:

(a) 1.5 kW **(b)** 0.5 MW **(c)** 350 mW **(d)** 9000 μW

11. Un dispositivo electrónico en particular utiliza 100 mW de potencia. Si funciona durante 24 h, ¿cuántos joules de energía consume?

***12.** Si se permite que un foco de 300 W permanezca encendido continuamente durante 30 días, ¿cuántos kilowatts-hora de energía consume?

***13.** Al final de un periodo de 31 días, su recibo de electricidad muestra que utilizó 1500 kWh. ¿Cuál fue su consumo de potencia diario promedio?

14. Convierta 5×10^6 watts-minutos en kWh.

15. Convierta 6700 watts-segundos en kWh.

16. ¿Durante cuántos segundos debe haber 5 A de corriente a través de un resistor de 47 Ω para consumir 25 J?

SECCIÓN 4–2 Potencia en un circuito eléctrico

17. Si una fuente de 75 V está suministrando 2 A a una carga, ¿cuál es el valor de resistencia de la carga?

18. Si un resistor tiene 5.5 V entre sus extremos y 3 mA a través de él, ¿cuál es la potencia?

19. Un calentador eléctrico funciona con 120 V y absorbe 3 A de corriente. ¿Cuánta potencia utiliza?

20. ¿Cuál es la potencia cuando 500 mA de corriente recorren un resistor de 4.7 kΩ?

21. Calcule la potencia disipada por un resistor de 10 kΩ que transporta 100 μA.

22. Si entre los extremos de un resistor de 680 Ω existen 60 V, ¿cuál es la potencia?

23. Se conecta un resistor de 56 Ω entre las terminales de una batería de 1.5 V. ¿Cuál es la disipación de potencia en el resistor?

24. Si un resistor tiene que transportar 2 A de corriente y manejar 100 W de potencia, ¿de cuántos ohms debe ser? Suponga que el voltaje puede ser ajustado a cualquier valor requerido.

25. Una fuente de 12 V se conecta entre los extremos de un resistor de 10 Ω.

(a) ¿Cuánta energía se utiliza en dos minutos?

(b) Si después de un minuto se desconecta el resistor, ¿es la potencia durante este primer minuto mayor, menor o igual a la potencia que hay durante un intervalo de dos minutos?

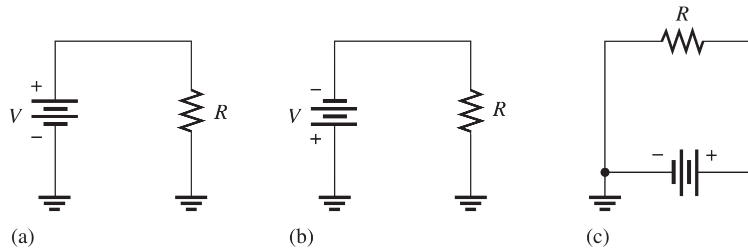
SECCIÓN 4–3 Clasificaciones de potencia en resistores

26. Un resistor de 6.8 kΩ se quemó en un circuito. Usted debe reemplazarlo por otro con el mismo valor de resistencia. Si el resistor transporta 10 mA, ¿cuál deberá ser su clasificación de potencia? Suponga que dispone de resistores en todas las clasificaciones de potencia estándar.

27. Cierto tipo de resistor viene en las siguientes clasificaciones: 3 W, 5 W, 8 W, 12 W, 20 W. Una aplicación en particular requiere de un resistor que pueda manejar aproximadamente 8 W. ¿Qué clasificación utilizaría usted para tener un margen de seguridad mínimo del 20% sobre el valor nominal? ¿Por qué?

SECCIÓN 4–4 Conversión de energía y caída de voltaje en una resistencia

28. En cada circuito de la figura 4-13, asigne la polaridad apropiada de la caída de voltaje entre los extremos del resistor.



▲ FIGURA 4–13

SECCIÓN 4–5 Fuentes de potencia

29. Una carga de 50 Ω utiliza 1 W de potencia. ¿Cuál es el voltaje de salida de la fuente de potencia?

30. Suponga que una batería D alcalina puede mantener un voltaje promedio de 1.25 V durante 90 horas en una carga de 10 Ω antes de volverse inutilizable. ¿Qué promedio de potencia se suministra a la carga durante la vida de la batería?

31. ¿Cuál es la energía total en joules que suministra la batería del problema 30 durante 90 horas?

32. Una batería puede proporcionar un promedio de 1.5 A de corriente durante 24 h. ¿Cuál es su capacidad en amperes-hora?

33. ¿Cuánta corriente promedio puede ser absorbida de una batería de 80 Ah durante 10 h?

34. Si la capacidad de una batería es de 650 mAh, ¿cuánta corriente promedio suministrará durante 48 h?

35. Si la potencia de entrada es de 500 mW y la de salida de 400 mW, ¿cuánta potencia se pierde? ¿Cuál es la eficiencia de esta fuente de potencia?

36. Para operar al 85% de eficiencia, ¿cuánta potencia de salida debe producir una fuente si la potencia de entrada es de 5 W?

*__37.__ Cierta fuente de potencia suministra 2 W de forma continua a una carga. Está operando al 60% de eficiencia. En un periodo de 24 h, ¿cuántos kilowatts-hora utiliza la fuente de potencia?



Localización de fallas y análisis con archivos Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

38. Abra el archivo P04-38 y determine la corriente, el voltaje y la resistencia. Con los valores medidos, calcule la potencia.

39. Abra el archivo P04-39 y determine la corriente, el voltaje y la resistencia. Calcule la potencia con estos valores.

40. Abra el archivo P04-40. Mida la corriente en la lámpara, y determine si el valor concuerda con el que encontró mediante su clasificación de potencia y voltaje.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 4–1 Energía y potencia

1. Potencia es la razón de cambio a la cual se utiliza la energía.

2. $P = W/t$

3. El watt es la unidad de potencia. Un watt es la potencia cuando se utiliza 1 J de energía en 1 segundo.

4. **(a)** 68,000 W = 68 kW **(b)** 0.005 W = 5 mW **(c)** 0.000025 W = 25 μW
5. W = (0.1 kW) (10 h) = 1 kWh
6. 2000 Wh = 2 kWh
7. 360,000 Ws = 0.1 kWh

SECCIÓN 4–2 Potencia en un circuito eléctrico

1. P = (10 V)(3 A) = 30 W
2. P = (24 V)(50 mA) = 1.2 W; 1.2 W; los valores son los mismos porque toda la energía generada por la fuente es disipada por la resistencia.
3. $P = (5\text{ A})^2(56\ \Omega) = 1400$ W
4. $P = (20\text{ mA})^2(4.7\text{ k}\Omega) = 1.88$ W
5. $P = (5\text{ V})^2/10\ \Omega = 2.5$ W
6. $P = (8\text{ V})^2/2.2\text{ k}\Omega = 29.1$ mW
7. $R = 75\text{ W}/(0.5\text{ A})^2 = 300\ \Omega$

SECCIÓN 4–3 Valores nominales de potencia en resistores

1. Los resistores tienen resistencia y una potencia nominal.
2. Un área superficial más grande de un resistor disipa más potencia.
3. 0.125 W, 0.25 W, 0.5 W, 1 W
4. En lugar de 0.3 W se deberá utilizar una potencia nominal de 0.5 W.

SECCIÓN 4–4 Conversión de energía y caída de voltaje en resistencias

1. La conversión de energía en un resistor es provocada por colisiones de electrones libres con los átomos presentes en el material.
2. La caída de voltaje es una disminución en el voltaje presente entre los extremos de un resistor, y es provocada por una pérdida de energía.
3. La caída de voltaje es positiva o negativa en la dirección de corriente convencional.

SECCIÓN 4–5 Fuentes de potencia

1. Más corriente implica más carga.
2. P = (10 V)(0.5 A) = 5 W
3. t = 100 Ah/5 A = 20 h
4. P = (12 V)(5 A) = 60 W
5. Eficiencia = (0.75 W/1 W)100% = 75%; $P_{\text{PÉRDIDA}}$ = 1000 mW − 750 mW = 250 mW

Una aplicación de circuito

1. Dos
2. 10 Ω, 10 W; 100 Ω, 1 W; 400 Ω, ¼ W

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

4–1 3000 J
4–2 **(a)** 0.001 W **(b)** 0.0018 W **(c)** 1 W **(d)** 0.000001 W
4–3 2 kWh
4–4 **(a)** 40 W **(b)** 376 W **(c)** 625 mW
4–5 60 W
4–6 0.5 W
4–7 Sí
4–8 60 Ah
4–9 46 W

AUTOEVALUACIÓN

1. (c) **2.** (c) **3.** (a) **4.** (d) **5.** (b) **6.** (d) **7.** (a) **8.** (a)
9. (d) **10.** (d) **11.** (b) **12.** (c) **13.** (c) **14.** (a) **15.** (c) **16.** (a)
17. (b) **18.** (c)

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (a) **2.** (b) **3.** (a) **4.** (a) **5.** (a) **6.** (c)
7. (b) **8.** (c) **9.** (a) **10.** (b) **11.** (b) **12.** (c)

CIRCUITOS EN SERIE

5

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Identificar un circuito resistivo en serie
- Determinar la corriente a través de un circuito en serie
- Determinar la resistencia total en serie
- Aplicar la ley de Ohm a circuitos en serie
- Determinar el efecto total de fuentes de voltaje conectadas en serie
- Aplicar la ley del voltaje de Kirchhoff
- Utilizar un circuito en serie como divisor de voltaje
- Determinar potencia en un circuito en serie
- Medir voltaje con respecto a tierra
- Localizar fallas en circuitos en serie

TÉRMINOS CLAVE

- Abierto
- Corto
- Divisor de voltaje
- Ley del voltaje de Kirchhoff
- Serie
- Tierra de referencia

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación, se evaluará un circuito divisor de voltaje conectado a una batería de 12 V para proporcionar una selección de voltajes de referencia fijos y usarlos en un instrumento electrónico.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://www.prenhall.com/floyd

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 3 usted aprendió sobre la ley de Ohm y en el capítulo 4 sobre potencia en resistores. En este capítulo, se aplican estos conceptos a circuitos en los cuales los resistores están conectados en serie.

Los circuitos resistivos pueden ser de dos formas básicas: en serie y en paralelo. En este capítulo se estudian circuitos en serie. Los circuitos en paralelo se estudian en el capítulo 6, y en el 7 se examinan combinaciones de resistores en serie y en paralelo. En este capítulo, usted verá cómo se utiliza la ley de Ohm en circuitos en serie y aprenderá otra importante ley de circuito, la ley del voltaje de Kirchhoff. Además, se presentan varias aplicaciones de circuitos en serie, incluidos los divisores de voltaje.

Cuando se conectan resistores en serie y se aplica voltaje entre los extremos de la conexión en serie, existe sólo una trayectoria para la corriente; y, por consiguiente, cada resistor en serie tiene la misma cantidad de corriente a través de él. Todas las resistencias en serie se suman para producir una resistencia total. Las caídas de voltaje entre cada uno de los resistores se suman al voltaje aplicado entre los extremos de toda la conexión en serie.

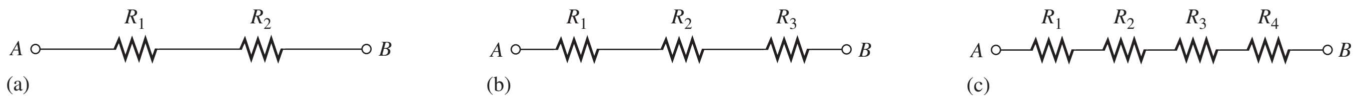
5–1 RESISTORES EN SERIE

Cuando se conectan en serie, los resistores forman una "hilera" en la cual existe sólo una trayectoria para la corriente.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Identificar un circuito resistivo en serie**
  - Transformar un ordenamiento físico de resistores en un diagrama

El diagrama de la figura 5-1(a) muestra dos resistores conectados en serie entre el punto *A* y el punto *B*. La parte (b) muestra tres resistores en serie y la parte (c) cuatro. Desde luego, puede haber cualquier número de resistores en un circuito en serie.



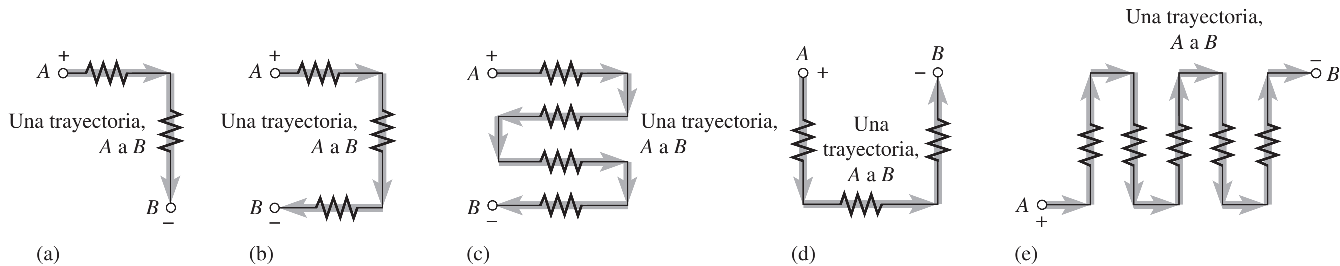
▲ **FIGURA 5–1**

Resistores en serie.

Cuando se conecta una fuente de voltaje entre el punto *A* y el punto *B*, el único camino para que la corriente llegue de un punto al otro en cualesquiera de las conexiones de la figura 5-1 es a través de cada uno de los resistores. El siguiente enunciado describe un circuito en serie.

Un circuito en serie proporciona sólo una trayectoria para el paso de la corriente entre dos puntos, de modo que la corriente es la misma a través de cada resistor en serie.

En un diagrama de circuito real, un circuito en serie no siempre es tan fácil de identificar visualmente como los circuitos de la figura 5-1. Por ejemplo, la figura 5-2 muestra resistores en serie dibujados de otras maneras con voltaje aplicado. Recuerde que si entre dos puntos existe sólo una trayectoria para la corriente, los resistores ubicados entre esos dos puntos están en serie, no importa cómo aparezcan en un diagrama.



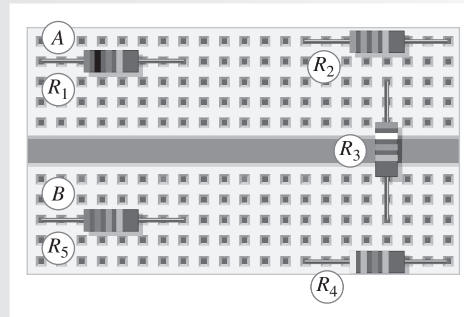
▲ **FIGURA 5–2**

Algunos ejemplos de circuitos en serie. Observe que la corriente es la misma en todos los puntos porque la corriente tiene sólo una trayectoria.

EJEMPLO 5–1

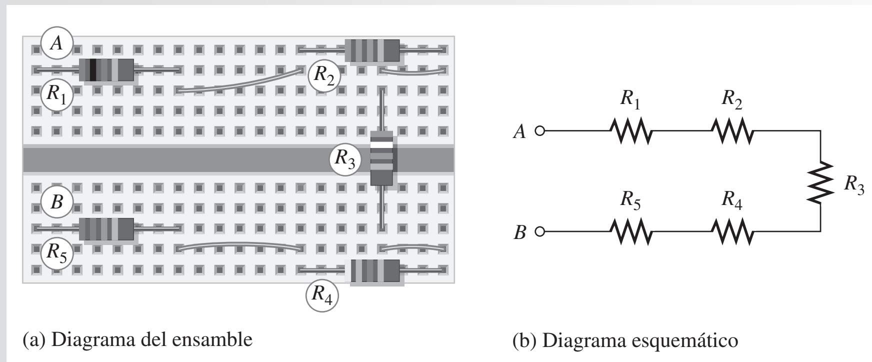
Suponga que cinco resistores están colocados en una tarjeta prototipo como se muestra en la figura 5-3. Conéctelos en serie de modo que, comenzando desde la terminal positiva (+), R_1 sea el primero, R_2 el segundo, R_3 el tercero, y así sucesivamente. Trace un diagrama que muestre esta conexión.

▶ FIGURA 5–3



Solución Los alambres están conectados como indica la figura 5-4(a), la cual es el diagrama del ensamble. El diagrama esquemático aparece en la figura 5-4(b). Advierta que el diagrama esquemático no necesariamente muestra la disposición física real de los resistores como lo hace el diagrama del ensamble. El diagrama esquemático muestra la forma en que están conectados eléctricamente los componentes; el diagrama del ensamble muestra cómo están dispuestos los componentes y su interconexión física.

▶ FIGURA 5–4



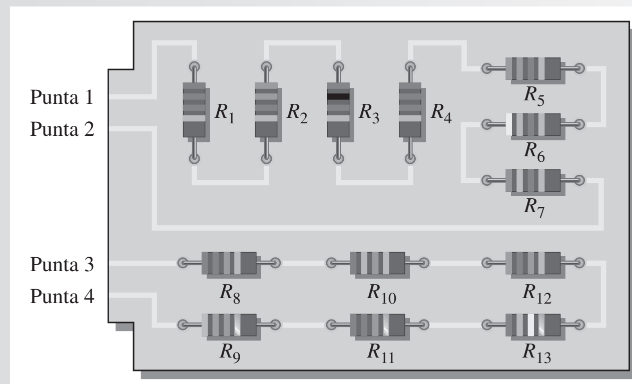
(a) Diagrama del ensamble (b) Diagrama esquemático

*Problema relacionado** **(a)** Muestre la forma en que usted reconectaría la tarjeta prototipo de la figura 5-4(a) de modo que todos resistores de número impar aparecieran primero, seguidos por los de número par. **(b)** Determine el valor de resistencia de cada resistor.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 5–2 Describa cómo están relacionados eléctricamente los resistores de la tarjeta de circuito impreso (PC, por sus siglas en inglés) mostrados en la figura 5-5. Determine el valor de resistencia de cada resistor.

▶ FIGURA 5–5



Solución Los resistores R_1 a R_7 están conectados en serie uno al otro. Esta combinación en serie está conectada entre las puntas 1 y 2 del circuito impreso.

Los resistores R_8 a R_{13} están conectados en serie uno al otro. Esta combinación en serie está conectada entre las puntas 3 y 4 del circuito impreso.

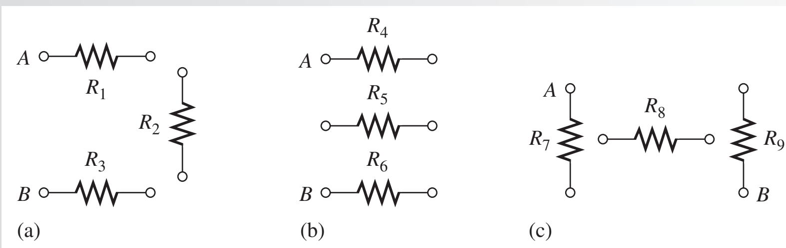
Los valores de los resistores son: $R_1 = 2.2\text{ k}\Omega$, $R_2 = 3.3\text{ k}\Omega$, $R_3 = 1.0\text{ k}\Omega$, $R_4 = 1.2\text{ k}\Omega$, $R_5 = 3.3\text{ k}\Omega$, $R_6 = 4.7\text{ k}\Omega$, $R_7 = 5.6\text{ k}\Omega$, $R_8 = 12\text{ k}\Omega$, $R_9 = 68\text{ k}\Omega$, $R_{10} = 27\text{ k}\Omega$, $R_{11} = 12\text{ k}\Omega$, $R_{12} = 82\text{ k}\Omega$ y $R_{13} = 270\text{ k}\Omega$.

Problema relacionado ¿Cómo cambia este circuito cuando se conectan las puntas 2 y 3 en la figura 5-5?

REPASO DE LA SECCIÓN 5-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. **¿Cómo están conectados los resistores en un circuito en serie?**
2. **¿Cómo puede identificarse un circuito en serie?**
3. **Complete el diagrama esquemático para los circuitos mostrados en la figura 5-6 conectando cada grupo de resistores en serie en orden numérico desde la terminal *A* hasta la terminal *B*.**
4. **Conecte cada grupo de resistores en serie que aparece en la figura 5-6 en serie uno con otro.**

▶ FIGURA 5–6



5–2 CORRIENTE EN UN CIRCUITO EN SERIE

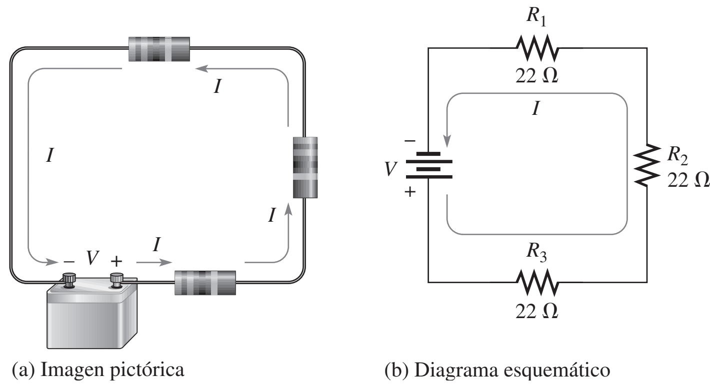
En un circuito en serie, la corriente es la misma a través de todos los puntos. La corriente a través de cada resistor incluido en un circuito en serie es la misma corriente que pasa por todos los demás resistores que están en serie con él.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la corriente a través de un circuito en serie**
  - Demostrar que la corriente es la misma en todos los puntos de un circuito en serie

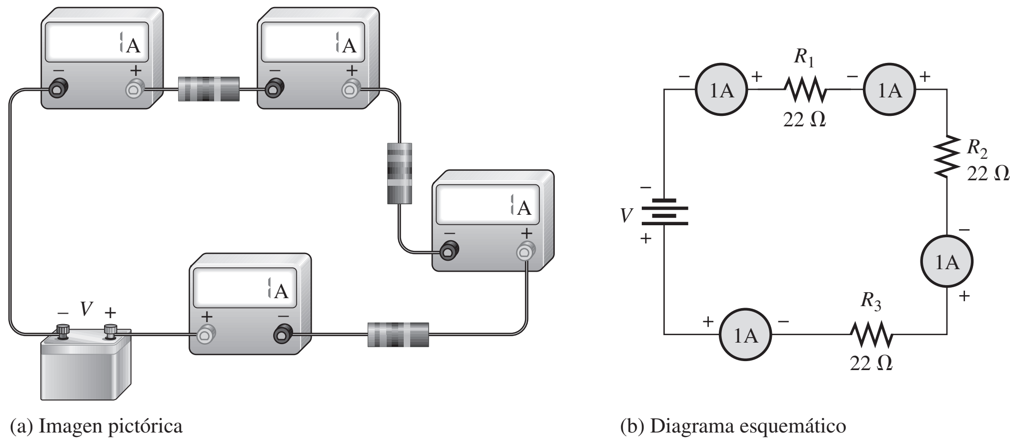
La figura 5-7 muestra tres resistores conectados en serie a un fuente de voltaje de cd. *En cualquier punto de este circuito*, *la corriente que entra a dicho punto debe ser igual a la corriente que sale de ese punto*, tal como se ilustra mediante la flechas direccionales de corriente. Observe también que la corriente que sale de cada resistor debe ser igual a la que entra porque no hay un lugar por donde pueda escaparse o dirigirse a otro lugar. Por consiguiente, en cada sección del circuito la corriente es la misma que hay en todas las demás secciones. Tiene sólo una trayectoria que va desde el lado positivo (+) de la fuente hasta el lado negativo (−).

Suponga que la batería de la figura 5-7 suministra un ampere de corriente a la resistencia en serie. De la terminal positiva de la batería sale un ampere de corriente. Cuando se conectan amperímetros en varios puntos del circuito, como indica la figura 5-8, cada medidor lee un ampere.



▲ **FIGURA 5–7**

En un circuito en serie, la corriente que entra a cualquier punto es la misma corriente que sale de dicho punto.



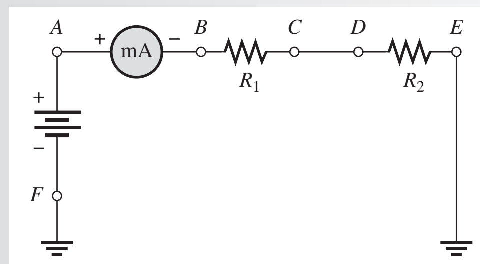
▲ **FIGURA 5–8**

En un circuito en serie, la corriente es la misma en todos los puntos.

REPASO DE LA SECCIÓN 5-2

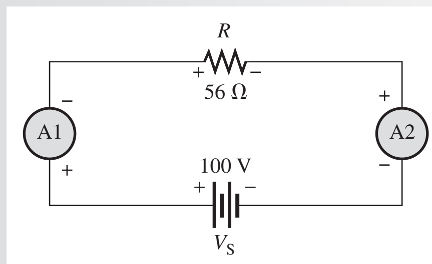
1. En un circuito con un resistor de 10 Ω y otro de 4.7 Ω en serie, hay 1 A de corriente a través del resistor de 10 Ω. ¿Cuánta corriente hay a través del resistor de 4.7 Ω?
2. Se conecta un multímetro entre los puntos *A* y *B* mostrados en la figura 5-9. Su lectura es igual a 50 mA. Si usted cambia de lugar el multímetro y lo conecta entre los puntos *C* y *D*, ¿cuánta corriente indicará? ¿Entre *E* y *F*?

▶ **FIGURA 5–9**



3. En la figura 5-10, ¿cuánta corriente indica el amperímetro 1? ¿Cuánta corriente indica el amperímetro 2?
4. Describa la corriente en un circuito en serie.

▶ FIGURA 5–10



5–3 RESISTENCIA TOTAL EN SERIE

La resistencia total de un circuito en serie es igual a la suma de todas las resistencias de cada resistor individual dispuesto en serie.

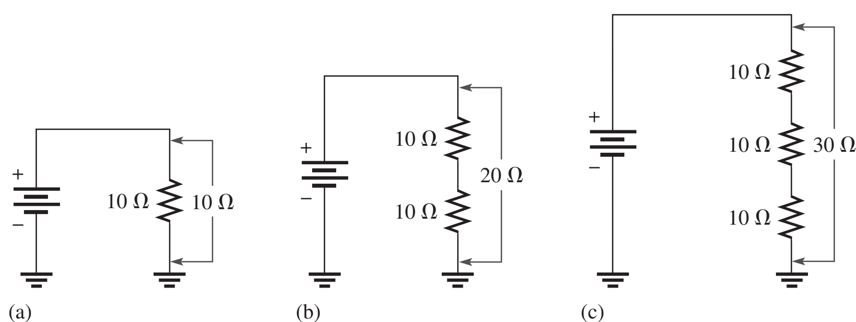
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la resistencia total en serie**
  - Explicar por qué los valores de resistencia se suman cuando los resistores están conectados en serie
  - Aplicar la fórmula de resistencia en serie

Suma de valores de resistores en serie

Cuando los resistores se conectan en serie, sus valores se suman porque cada resistor ofrece oposición a la corriente en proporción directa a su resistencia. Un mayor número de resistores conectados se opone más a la corriente. Más oposición a la corriente implica un valor más alto de resistencia. Por tanto, cada vez que un resistor se agrega en serie, la resistencia total aumenta.

La figura 5-11 ilustra cómo se suman las resistencias para incrementar la resistencia total. La figura 5-11(a) tiene un solo resistor de 10 Ω. La figura 5-11(b) muestra otro resistor de 10 Ω co-



▲ FIGURA 5–11

La resistencia total se incrementa con cada resistor adicional puesto en serie.

nectado en serie con el primero, lo cual produce una resistencia total de 20 Ω. Cuando se conecta un tercer resistor de 10 Ω en serie con los primeros dos resistores, como indica la figura 5-11(c), la resistencia total llega a ser de 30 Ω.

Fórmula de la resistencia en serie

Para cualquier número de resistores individuales conectados en serie, la resistencia total es la suma de cada uno de los valores individuales.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

Ecuación 5–1

donde R_T es la resistencia total y R_n es el último resistor colocado en la serie (n puede ser cualquier entero positivo igual al número de resistores en serie). Por ejemplo, si hay cuatro resistores en serie ($n = 4$), la fórmula para calcular la resistencia total es

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

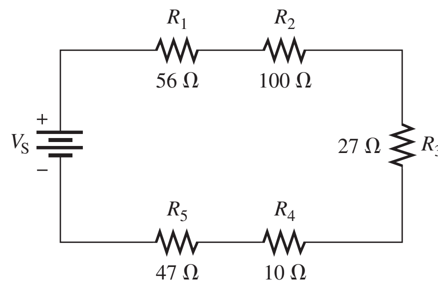
Si hay seis resistores en serie ($n = 6$), la fórmula para la resistencia total es

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$$

Para ilustrar el cálculo de la resistencia total en serie, determinemos R_T en el circuito de la figura 5-12, donde V_S es el voltaje de la fuente. El circuito tiene cinco resistores en serie. Para obtener la resistencia total, simplemente se suman los valores.

$$R_T = 56\ \Omega + 100\ \Omega + 27\ \Omega + 10\ \Omega + 47\ \Omega = 240\ \Omega$$

En la figura 5-12, observe que el orden en el cual se suman las resistencias no importa. Se pueden cambiar físicamente las posiciones de los resistores en el circuito sin afectar la resistencia total o la corriente.

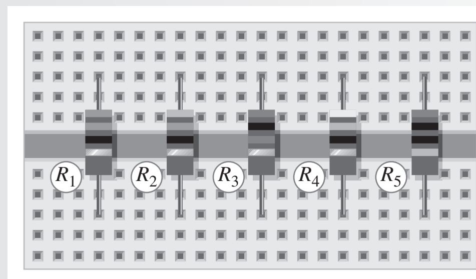


▲ **FIGURA 5–12**

Ejemplo de cinco resistores en serie.

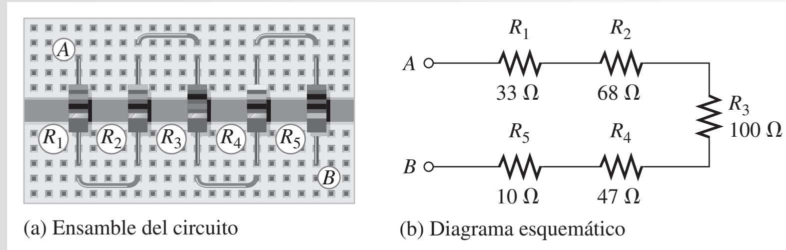
EJEMPLO 5–3 Conecte en serie los resistores de la figura 5-13 y determine la resistencia total, R_T.

▶ **FIGURA 5–13**



Solución Los resistores están conectados como se muestra en la figura 5-14. Encuentre la resistencia total sumando todos los valores.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 33\,\Omega + 68\,\Omega + 100\,\Omega + 47\Omega + 10\,\Omega = \mathbf{258\,\Omega}$$

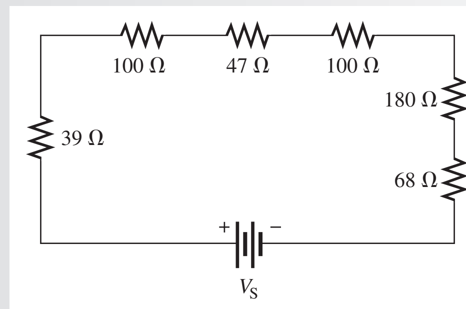


(a) Ensamble del circuito (b) Diagrama esquemático

▲ FIGURA 5–14

Problema relacionado Determine la resistencia total en la figura 5-14(a) si la posición de R_2 y R_4 se intercambia.

EJEMPLO 5–4 ¿Cuál es la resistencia total (R_T) en el circuito de la figura 5-15?



▲ FIGURA 5–15

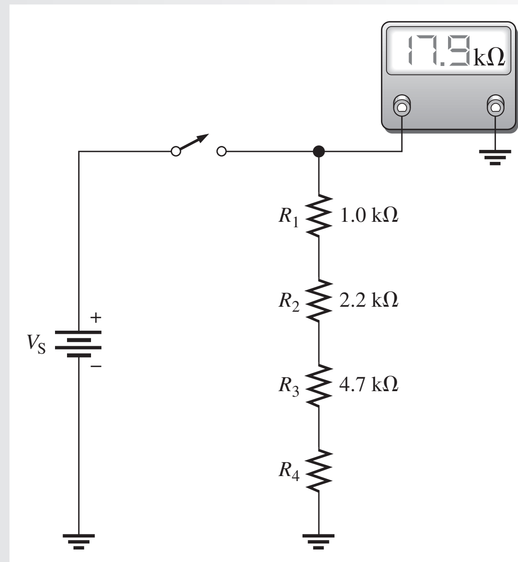
Solución Sume todos los valores.

$$R_T = 39\,\Omega + 100\,\Omega + 47\,\Omega + 100\,\Omega + 180\,\Omega + 68\,\Omega = \mathbf{534\,\Omega}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la resistencia total de los siguientes resistores en serie: 1.0 kΩ, 2.2 kΩ, 3.3 kΩ, y 5.6 kΩ?

EJEMPLO 5–5 Determine el valor de R_4 en el circuito de la figura 5-16.

▶ **FIGURA 5–16**



Solución Por la lectura del ohmmetro, $R_T = 17.9\text{ k}\Omega$.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Resolviendo para R_4 se obtiene

$$R_4 = R_T - (R_1 + R_2 + R_3) = 17.9\text{ k}\Omega - (1.0\text{ k}\Omega + 2.2\text{ k}\Omega + 4.7\text{ k}\Omega) = \mathbf{10\text{ k}\Omega}$$

Problema relacionado Determine el valor de R_4 en la figura 5-16 si la lectura del ohmmetro es de 14.7 kΩ.

Resistores en serie de igual valor

Cuando un circuito tiene en serie más de un resistor del mismo valor, existe un método abreviado para obtener la resistencia total. Simplemente se multiplica el valor de resistencia por el número de resistores de igual valor que están en serie. Este método es, en esencia, el mismo que sumar los valores. Por ejemplo, cinco resistores de 100 Ω en serie tienen una R_T de 5(100 Ω) = 500 Ω. En general, la fórmula se expresa como

$$R_T = nR$$ **Ecuación 5–2**

donde n es la cantidad de resistores de igual valor y R es el valor de resistencia.

EJEMPLO 5–6 Encuentre la R_T de ocho resistores de 22 Ω en serie.

Solución Encuentre la R_T sumando los valores.

$$R_T = 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega + 22\ \Omega = \mathbf{176\ \Omega}$$

No obstante, resulta mucho más fácil multiplicar para obtener el mismo resultado.

$$R_T = 8(22\ \Omega) = \mathbf{176\ \Omega}$$

Problema relacionado Encuentre la R_T de tres resistores de 1.0 kΩ y dos resistores de 720 Ω dispuestos en serie.

REPASO DE LA SECCIÓN 5-3

1. Los siguientes resistores (uno de cada uno) están en serie: 1.0 Ω, 2.2 Ω, 3.3 Ω, y 4.7 Ω. ¿Cuál es la resistencia total?
2. Los siguientes resistores están en serie: uno de 100 Ω, dos de 56 Ω, cuatro de 12 Ω, y uno de 330 Ω. ¿Cuál es la resistencia total?
3. Suponga que tiene un resistor de cada uno de los siguientes valores: 1.0 kΩ, 2.7 kΩ, 5.6 kΩ, y 560 kΩ. Para obtener una resistencia total de aproximadamente 13.8 kΩ, se necesita un resistor más. ¿Qué valor deberá tener dicho resistor?
4. ¿Cuál es la R_T de doce resistores de 56 Ω dispuestos en serie?
5. ¿Cuál es la R_T de veinte resistores de 5.6 kΩ y treinta de 8.2 kΩ dispuestos en serie?

5–4 APLICACIÓN DE LA LEY DE OHM

Los conceptos básicos de los circuitos en serie y de la ley de Ohm se pueden aplicar al análisis de circuitos en serie.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar la ley de Ohm en circuitos en serie**
  - Encontrar la corriente en un circuito en serie
  - Encontrar el voltaje entre los extremos de cada resistor en serie

Los siguientes son puntos clave a recordar cuando se analiza un circuito en serie:

1. La corriente a través de cualesquiera resistores dispuestos en serie es la misma que la corriente total.
2. Cuando se conoce el voltaje total aplicado y la resistencia total, es posible determinar la corriente total por medio de la ley de Ohm.

$$I_T = \frac{V_T}{R_T}$$

3. Cuando se conoce la caída de voltaje entre los extremos de uno de los resistores en serie (R_x), es posible determinar la corriente total por medio de la ley de Ohm.

$$I_T = \frac{V_x}{R_x}$$

4. Cuando se conoce la corriente total, es posible encontrar la caída de voltaje entre los extremos de cualquiera de los resistores en serie mediante la ley de Ohm.

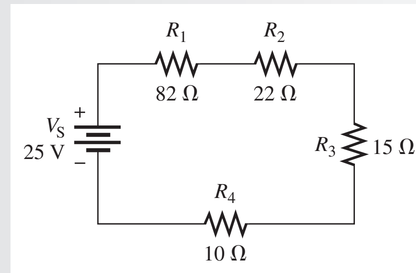
$$V_R = I_T R_x$$

5. La polaridad de una caída de voltaje entre los extremos de un resistor es positiva en el extremo del resistor que está más cercano a la terminal positiva de la fuente de voltaje.
6. Se define que la corriente a través de un resistor circula en la dirección que va del extremo positivo del resistor al extremo negativo.
7. En un circuito en serie, una abertura impide el paso de la corriente; y, por consiguiente, existe una caída de voltaje igual a cero entre los extremos de cada resistor en serie. El voltaje total aparece entre los puntos donde está la abertura.

A continuación se examinan varios ejemplos que utilizan la ley de Ohm para efectuar el análisis de un circuito en serie.

EJEMPLO 5–7 Encuentre la corriente en el circuito de la figura 5-17.

▶ **FIGURA 5–17**



Solución El voltaje de la fuente V_S y la resistencia total R_T determinan la corriente. Primero, calcule la resistencia total.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 82\ \Omega + 22\ \Omega + 15\ \Omega + 10\ \Omega = 129\ \Omega$$

A continuación, use la ley de Ohm para calcular la corriente.

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{25\text{ V}}{129\ \Omega} = 0.194\text{ A} = \mathbf{194\ mA}$$

donde V_S es el voltaje total e I es la corriente total. Recuerde que existe la misma corriente en todos los puntos del circuito. Por tanto, cada resistor tiene 194 mA a través de él.

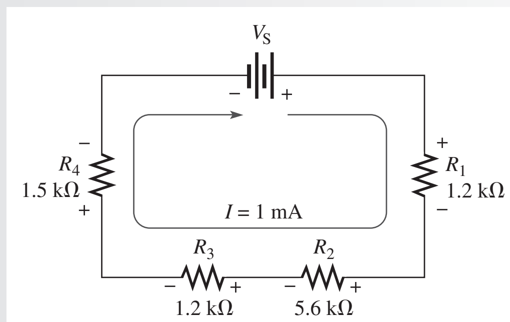
Problema relacionado ¿Cuál es la corriente en el circuito de la figura 5-17 si R_4 cambia a 100 Ω?



Use el archivo Multisim E05-07 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 5–8 La corriente en el circuito de la figura 5-18 es de 1 mA. Con esta cantidad de corriente, ¿cuál debe ser el voltaje de la fuente V_S?

▶ **FIGURA 5–18**



Solución Para calcular V_S, primero se determina R_T.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 1.2\text{ k}\Omega + 5.6\text{ k}\Omega + 1.2\text{ k}\Omega + 1.5\text{ k}\Omega = 9.5\text{ k}\Omega$$

A continuación, use la ley de Ohm para determinar V_S.

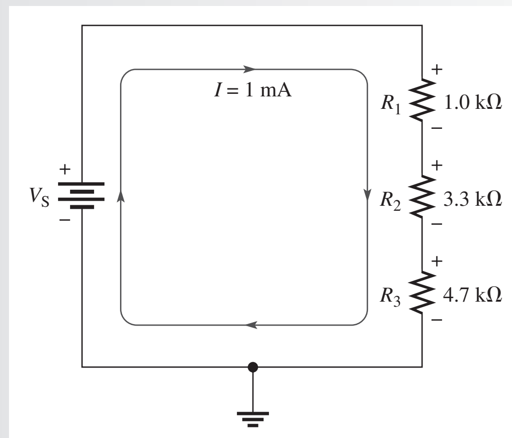
$$V_S = IR_T = (1\text{ mA})(9.5\text{ k}\Omega) = \mathbf{9.5\ V}$$

Problema relacionado Calcule V_S si el resistor de 5.6 kΩ cambia a 3.9 kΩ con igual corriente.



Use el archivo Multisim E05-08 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 5–9 Calcule el voltaje entre los extremos de cada uno de los resistores que aparecen en la figura 5-19 y encuentre el valor de V_S. ¿A qué valor máximo se puede elevar V_S si la corriente ha de limitarse a 5 mA?



▲ **FIGURA 5–19**

Solución Según la ley de Ohm, el voltaje que hay entre los extremos de cada resistor es igual a su resistencia multiplicada por la corriente a través de él. Use la fórmula de la ley de Ohm $V = IR$ para determinar el voltaje entre los extremos de cada uno de los resistores. Tenga en cuenta que la corriente es igual en cada uno de los resistores. El voltaje entre los extremos de R_1 (designado V_1) es

$$V_1 = IR_1 = (1\text{ mA})(1.0\text{ k}\Omega) = \mathbf{1\ V}$$

El voltaje entre los extremos de R_2 es

$$V_2 = IR_2 = (1\text{ mA})(3.3\text{ k}\Omega) = \mathbf{3.3\ V}$$

El voltaje entre los extremos de R_3 es

$$V_3 = IR_3 = (1\text{ mA})(4.7\text{ k}\Omega) = \mathbf{4.7\ V}$$

Para encontrar el valor de V_S, primero determine R_T.

$$R_T = 1.0\text{ k}\Omega + 3.3\text{ k}\Omega + 4.7\text{ k}\Omega = 9\text{ k}\Omega$$

El voltaje de la fuente V_S es igual a la corriente multiplicada por la resistencia total.

$$V_S = IR_T = (1\text{ mA})(9\text{ k}\Omega) = \mathbf{9\ V}$$

Advierta que si suma las caídas de voltaje de los resistores totalizan 9 V, lo cual es lo mismo que el voltaje de la fuente.

V_S se puede incrementar a cierto valor cuando $I = 5$ mA. Calcule el valor máximo de V_S como sigue:

$$V_{S(máx)} = IR_T = (5\text{ mA})(9\text{ k}\Omega) = \mathbf{45\text{ V}}$$

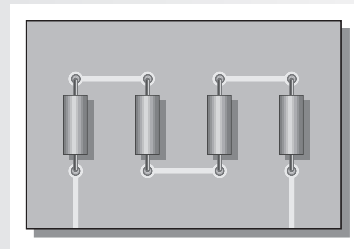
Problema relacionado Repita los cálculos para V_1, V_2, V_3, V_S, y $V_{S(máx)}$ si $R_3 = 2.2\text{ k}\Omega$ e I se mantiene en 1 mA.



Use el archivo Multisim E05-09 para verificar los resultados calculados en el ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

EJEMPLO 5–10 Algunos resistores no están codificados con bandas de color, pero tienen los valores estampados en su superficie. Cuando se ensambló la tarjeta de circuito mostrada en la figura 5-20, los resistores fueron montados erróneamente con los rótulos hacia abajo, y no existe documentación que muestre los valores del resistor. Sin quitar los resistores de la tarjeta, use la ley de Ohm para determinar la resistencia de cada uno. Suponga que se dispone de un multímetro y una fuente de potencia, pero la función ohmmetro del multímetro no funciona.

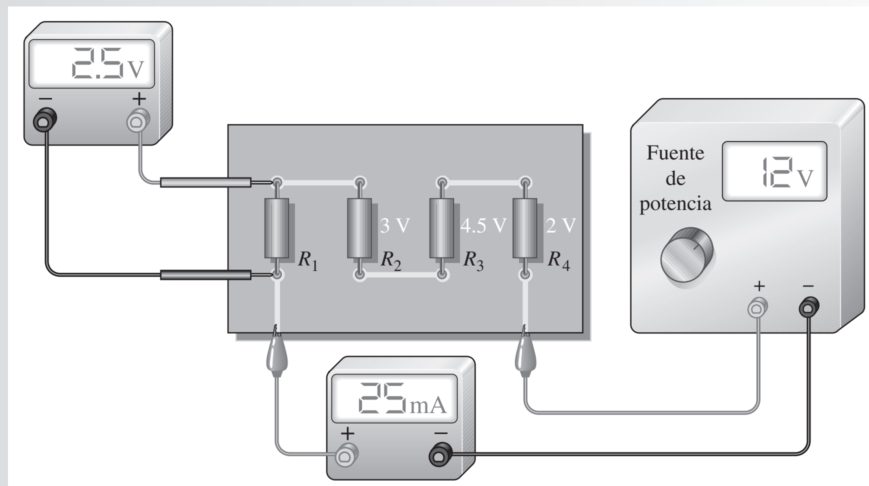
▶ **FIGURA 5–20**



Solución Todos los resistores están en serie, de modo que la corriente es la misma a través de cada uno. Mida la corriente conectando una fuente de 12 V (de valor arbitrario) y un amperímetro como indica la figura 5-21. Mida el voltaje entre los extremos de cada resistor. Comience con el voltímetro entre los extremos del primer resistor y luego repita la medición para los otros tres resistores. Como ilustración, se supone que los valores de voltaje indicados en la tarjeta son los valores medidos.

▶ **FIGURA 5–21**

Se indican las lecturas de voltímetro que hay en cada resistor.



Determine la resistencia de cada resistor sustituyendo los valores de corriente y voltaje medidos en la fórmula de la ley de Ohm.

$$R_1 = \frac{V_1}{I} = \frac{2.5\text{ V}}{25\text{ mA}} = \mathbf{100\ \Omega}$$

$$R_2 = \frac{V_2}{I} = \frac{3\text{ V}}{25\text{ mA}} = \mathbf{120\ \Omega}$$

$$R_3 = \frac{V_3}{I} = \frac{4.5\text{ V}}{25\text{ mA}} = \mathbf{180\ \Omega}$$

$$R_4 = \frac{V_4}{I} = \frac{2\text{ V}}{25\text{ mA}} = \mathbf{80\ \Omega}$$

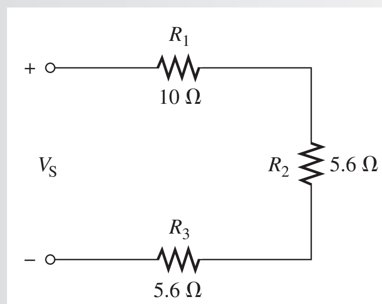
Observe que el resistor con el valor más grande tiene la caída de voltaje más grande entre sus extremos.

Problema relacionado ¿Cuál es una manera más fácil de determinar los valores de resistencia?

REPASO DE LA SECCIÓN 5-4

1. Una batería de 10 V se conecta a través de tres resistores de 100 Ω en serie. ¿Cuál es la corriente que pasa por cada resistor?
2. ¿Cuánto voltaje se requiere para producir 50 mA a través del circuito de la figura 5-22?

▶ FIGURA 5–22



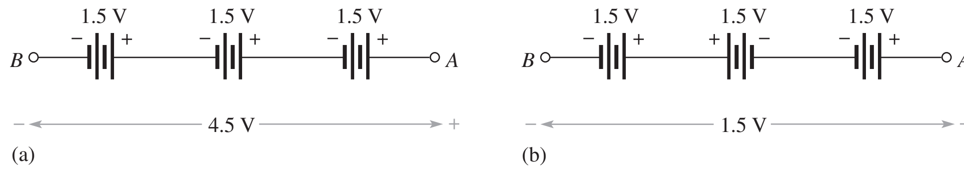
3. ¿Cuál es la caída de voltaje a través de un resistor en la figura 5-22 cuando la corriente es de 50 mA?
4. Existen cuatro resistores de igual valor conectados en serie con una fuente de 5 V. Se mide una corriente de 4.63 mA. ¿Cuál es el valor de cada resistor?

5–5 FUENTES DE VOLTAJE EN SERIE

Recuerde que una fuente de voltaje es una fuente de energía que proporciona un voltaje constante a una carga. Las baterías y las fuentes de potencia electrónicas son ejemplos prácticos de fuentes de voltaje de cd.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar el efecto total de fuentes de voltaje conectadas en serie**
  - Determinar el voltaje total de fuentes dispuestas en serie con las mismas polaridades
  - Determinar el voltaje total de fuentes dispuestas en serie con polaridades opuestas



▲ FIGURA 5–23

Las fuentes de voltaje en serie se suman algebraicamente.

Cuando dos o más fuentes de voltaje están en serie, el voltaje total es igual a la suma algebraica de los voltajes de fuente individuales. La suma algebraica implica que las polaridades de las fuentes deben ser incluidas cuando las fuentes se combinan en serie. Las fuentes con polaridades opuestas tienen voltajes con signos opuestos.

$$V_{S(tot)} = V_{S1} + V_{S2} + \cdots + V_{Sn}$$

Cuando todas las fuentes de voltaje están en la misma dirección en cuanto a sus polaridades, como en la figura 5-23(a), todos los voltajes tienen el mismo signo cuando se suman; existe un total de 4.5 V de la terminal *A* a la terminal *B*, siendo *A* más positiva que *B*.

$$V_{AB} = 1.5\text{ V} + 1.5\text{ V} + 1.5\text{ V} = +4.5\text{ V}$$

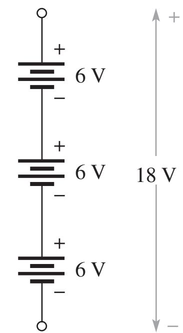
El voltaje tiene un subíndice doble, *AB*, para indicar que es el voltaje en el punto *A* con respecto al punto *B*.

En la figura 5-23(b), la fuente de voltaje intermedia se opone a las otras dos fuentes; por lo que su voltaje tiene un signo opuesto cuando se suma a los otros voltajes. En este caso el voltaje total de *A* a *B* es

$$V_{AB} = +1.5\text{ V} - 1.5\text{ V} + 1.5\text{ V} = +1.5\text{ V}$$

La terminal *A* es 1.5 V más positiva que la terminal *B*.

Un ejemplo conocido de fuentes de voltaje en serie es la linterna. Cuando se ponen dos baterías de 1.5 V en una linterna, están conectadas en serie, lo que da un total de 3 V. Al conectar en serie baterías u otras fuentes de voltaje para incrementar el voltaje total, siempre se conectan a partir de la terminal positiva (+) de una fuente hacia la terminal negativa (−) de otra fuente. Tal conexión se ilustra en la figura 5-24.

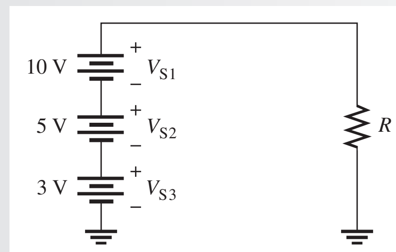


▲ FIGURA 5–24

Conexión de tres baterías de 6 V para obtener 18 V.

EJEMPLO 5–11 ¿Cuál es el voltaje de fuente total ($V_{S(tot)}$) en el circuito de la figura 5-25?

▶ FIGURA 5–25

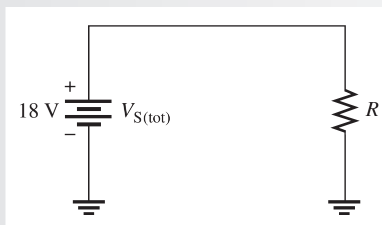


Solución La polaridad de cada fuente es la misma (las fuentes están conectadas en la misma dirección en el circuito). Sume los tres voltajes para obtener el total.

$$V_{S(tot)} = V_{S1} + V_{S2} + V_{S3} = 10\text{ V} + 5\text{ V} + 3\text{ V} = \mathbf{18\text{ V}}$$

Las tres fuentes individuales pueden ser reemplazadas por una sola fuente equivalente de 18 V con su polaridad como indica la figura 5-26.

▶ FIGURA 5–26



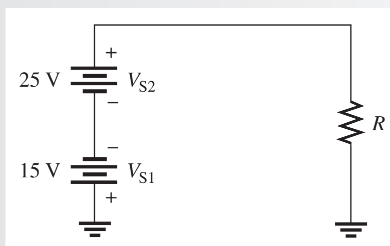
Problema relacionado Si V_{S3} se invierte en la figura 5-25, ¿cuál es el voltaje de fuente total?



Use el archivo Multisim E05-11 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 5–12 Determine $V_{S(tot)}$ en el circuito de la figura 5-27.

▶ FIGURA 5–27

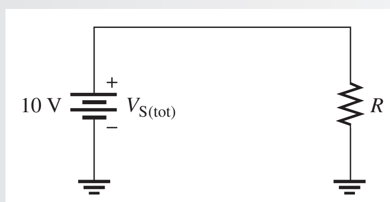


Solución Estas fuentes están conectadas en direcciones opuestas. Si se recorre el circuito en el sentido de las manecillas del reloj, se va de más a menos a través de V_{S1}, y de menos a más a través de V_{S2}. El voltaje total es la diferencia de los dos voltajes de fuente (suma algebraica de valores de signo opuesto). El voltaje total tiene la misma polaridad que la fuente de valor más grande. En este caso se elegirá V_{S2} como positiva.

$$V_{S(tot)} = V_{S2} - V_{S1} = 25\text{ V} - 15\text{ V} = \mathbf{10\text{ V}}$$

Las dos fuentes que aparecen en la figura 5-27 pueden ser reemplazadas por una sola fuente equivalente de 10 V con la polaridad como indica la figura 5-28.

▶ FIGURA 5–28



Problema relacionado Si se agrega una fuente de 8 V en la dirección de V_{S1} en la figura 5-27, ¿cuál será $V_{S(tot)}$?

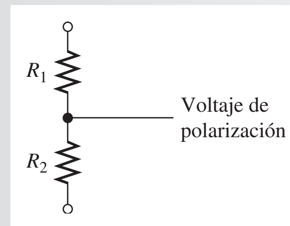


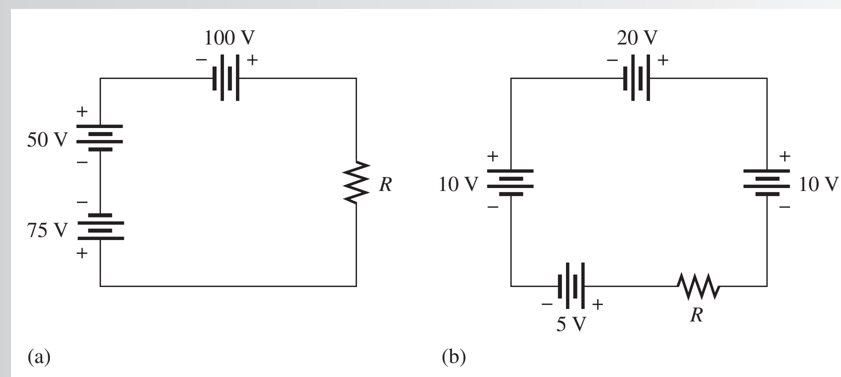
Use el archivo Multisim E05-12 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 5-5

1. Cuatro baterías de linterna de 1.5 V se conectan en serie de más a menos. ¿Cuál es el voltaje total de las cuatro baterías?
2. ¿Cuántas baterías de 12 V deben conectarse en serie para producir 60 V? Trace un diagrama esquemático que muestre las conexiones de las baterías.
3. El circuito resistivo mostrado en la figura 5-29 se utiliza para polarizar un amplificador transistorizado. Muestre cómo se deben conectar dos fuentes de potencia de 15 V para obtener 30 V de un lado a otro de los dos resistores.
4. Determine el voltaje de fuente total en cada circuito de la figura 5-30.
5. Trace el circuito de fuente única equivalente para cada uno de los circuitos mostrados en la figura 5-30.

▶ FIGURA 5–29





▲ FIGURA 5–30

5–6 LEY DEL VOLTAJE DE KIRCHHOFF

La ley del voltaje de Kirchhoff es una ley fundamental de circuito que establece que la suma algebraica de todos los voltajes localizados en una sola trayectoria cerrada es cero o, en otras palabras, que la suma de las caídas de voltaje es igual al voltaje de fuente total.

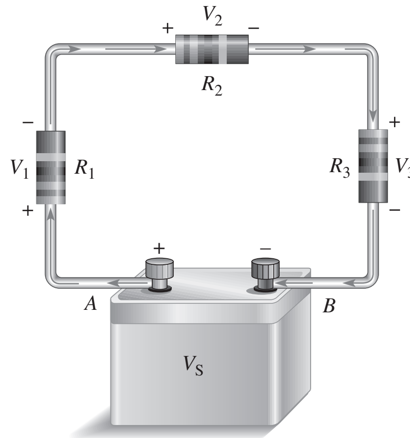
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar la ley del voltaje de Kirchhoff**
  - Enunciar la ley del voltaje de Kirchhoff
  - Determinar el voltaje de fuente sumando las caídas de voltaje
  - Determinar una caída de voltaje desconocida

En un circuito eléctrico, los voltajes de un lado a otro de los resistores (caídas de voltaje) *siempre* tienen polaridades opuestas a la polaridad del voltaje de fuente. Por ejemplo, en la figura 5-31, recorra el circuito en el sentido de las manecillas del reloj. Observe que la polaridad de la fuente

▶ **FIGURA 5–31**

Ilustración de las polaridades del voltaje en un circuito de espira cerrada.



es de menos a más, y que cada caída de voltaje es de más a menos. Las caídas de voltaje de uno a otro lado de los resistores están señaladas mediante V_1, V_2, y así sucesivamente.

En la figura 5-31, la corriente sale del lado positivo de la fuente y pasa a través de los resistores tal como indican las flechas. La corriente se dirige hacia el lado positivo de cada resistor y sale por el lado negativo. La caída en el nivel de energía de uno a otro lado de un resistor crea una diferencia de potencial, o una caída de voltaje, con polaridad más a menos en dirección de la corriente.

En el circuito de la figura 5-31, el voltaje del punto *A* al punto *B* es el voltaje de la fuente, V_S. Asimismo, el voltaje de *A* a *B* es la suma de las caídas de voltaje de los resistores en serie. Por consiguiente, el voltaje de fuente es igual a la suma de las tres caídas de voltaje, conforme lo establece la **ley del voltaje de Kirchhoff.**

En un circuito, la suma de todas las caídas de voltaje localizadas en una trayectoria cerrada única es igual al voltaje de fuente total encontrado en dicha espira.

El concepto general de la ley del voltaje de Kirchhoff está ilustrado en la figura 5-32 y se expresa mediante la ecuación 5-3.

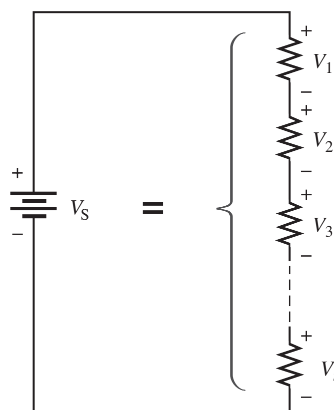
Ecuación 5–3

$$V_S = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$$

donde el subíndice *n* representa el número de caídas de voltaje.

▶ **FIGURA 5–32**

La suma de *n* caídas de voltaje es igual al voltaje de la fuente.



Al sumar todas las caídas de voltaje localizadas en una trayectoria cerrada y restar luego ese total al voltaje de fuente, el resultado es cero. Este resultado ocurre porque la suma de las caídas de voltaje siempre es igual al voltaje de la fuente.

La suma algebraica de todos los voltajes (tanto de fuente como de caídas) localizados en una trayectoria cerrada única es cero.

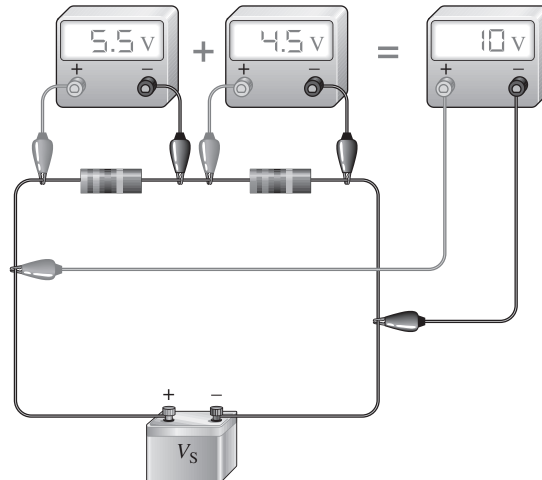
Por consiguiente, otra forma de expresar la ley del voltaje de Kirchhoff en forma de ecuación es

$$V_S - V_1 - V_2 - V_3 - \cdots - V_n = 0$$

Ecuación 5–4

Se puede verificar la ley del voltaje de Kirchhoff conectando un circuito y midiendo cada voltaje de resistor y el voltaje de fuente como se ilustra en la figura 5-33. Cuando los voltajes de los resistores se suman, el resultado es el voltaje de la fuente. Se puede sumar cualquier cantidad de resistores.

Los tres ejemplos siguientes utilizan la ley del voltaje de Kirchhoff para resolver problemas de circuitos.

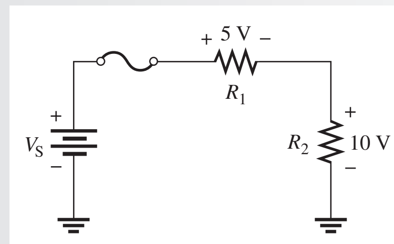


▲ **FIGURA 5–33**

Ilustración de una verificación experimental de la ley del voltaje de Kirchhoff.

EJEMPLO 5–13 Determine el voltaje de la fuente V_S en la figura 5-34 donde se dan las dos caídas de voltaje. En el fusible no hay caída de voltaje.

▶ **FIGURA 5–34**



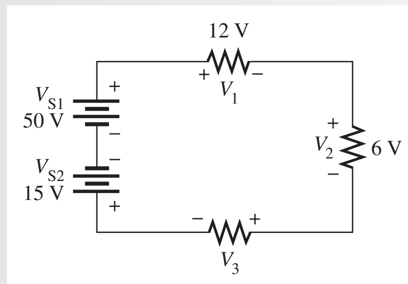
Solución Con arreglo a la ley del voltaje de Kirchhoff, (Ec. 5-3), el voltaje de la fuente (voltaje aplicado) debe ser igual a la suma de las caídas de voltaje. Al sumar las caídas de voltaje se obtiene el valor del voltaje de la fuente.

$$V_S = 5\text{ V} + 10\text{ V} = \mathbf{15\ V}$$

Problema relacionado Si V_S se incrementa a 30 V, determine las dos caídas de voltaje. ¿Cuál es el voltaje en cada componente (incluido el fusible) si el fusible se funde?

EJEMPLO 5–14 Determine la caída de voltaje desconocida, V_3, en la figura 5-35.

▶ **FIGURA 5–35**



Solución De acuerdo con la ley del voltaje de Kirchhoff (Ec. 5-4), la suma algebraica de todos los voltajes localizados en el circuito es cero. Se conoce el valor de cada caída de voltaje excepto el de V_3. Sustituya estos valores en la ecuación.

$$-V_{S2} + V_{S1} - V_1 - V_2 - V_3 = 0$$
$$-15\text{ V} + 50\text{ V} - 12\text{ V} - 6\text{ V} - V_3 = 0\text{ V}$$

A continuación, combine los valores conocidos, transponga al lado derecho de la ecuación la cantidad de 17 V y cancele los signos menos.

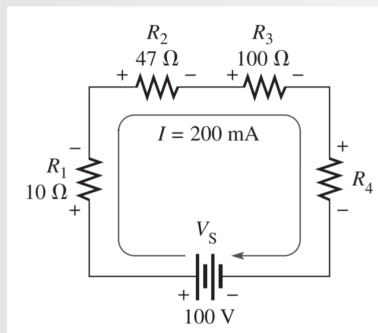
$$17\text{ V} - V_3 = 0\text{ V}$$
$$-V_3 = -17\text{ V}$$
$$V_3 = \mathbf{17\text{ V}}$$

La caída de voltaje de un lado a otro de R_3 es 17 V, y su polaridad es la mostrada en la figura 5-35.

Problema relacionado Determine V_3 si la polaridad de V_{S2} se invierte en la figura 5-35.

EJEMPLO 5–15 Encuentre el valor de R_4 en la figura 5-36.

▶ **FIGURA 5–36**



Solución En este problema se utilizará la ley de Ohm y la ley del voltaje de Kirchhoff.

En primer lugar, use la ley de Ohm para encontrar la caída de voltaje en cada uno de los resistores conocidos.

$$V_1 = IR_1 = (200\text{ mA})(10\ \Omega) = 2.0\text{ V}$$
$$V_2 = IR_2 = (200\text{ mA})(47\ \Omega) = 9.4\text{ V}$$
$$V_3 = IR_3 = (200\text{ mA})(100\ \Omega) = 20\text{ V}$$

A continuación, use la ley del voltaje de Kirchhoff para calcular V_4, la caída de voltaje en el resistor desconocido.

$$V_S - V_1 - V_2 - V_3 - V_4 = 0\text{ V}$$
$$100\text{ V} - 2.0\text{ V} - 9.4\text{ V} - 20\text{ V} - V_4 = 0\text{ V}$$
$$68.6\text{ V} - V_4 = 0\text{ V}$$
$$V_4 = 68.6\text{ V}$$

Ahora que conoce V_4, utilice la ley de Ohm para calcular R_4.

$$R_4 = \frac{V_4}{I} = \frac{68.6\text{ V}}{200\text{ mA}} = \mathbf{343\ \Omega}$$

Es muy probable que este resistor sea de 330 Ω porque 343 Ω se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia estándar (+5%) de 330 Ω.

Problema relacionado En la figura 5-36, determine R_4 con $V_S = 150$ V e $I = 200$ mA.



Use el archivo Multisim E05-15 para verificar los resultados calculados en el ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 5-6

1. Enuncie la ley del voltaje de Kirchhoff de dos maneras.
2. Se conecta una fuente de 50 V a un circuito resistivo en serie. ¿Cuál es la suma de las caídas de voltaje en este circuito?
3. Se conectan en serie dos resistores de igual valor entre las terminales de una batería de 10 V. ¿Cuál es la caída de voltaje en cada resistor?
4. En un circuito en serie con una fuente de 25 V, hay tres resistores. Una caída de voltaje es de 5 V y la otra de 10 V. ¿Cuál es el valor de la tercera caída de voltaje?
5. Las caídas de voltaje individuales localizadas en un circuito en serie son como sigue: 1 V, 3 V, 5 V, 8 V, y 7 V. ¿Cuál es el voltaje total aplicado entre los extremos de la conexión en serie?

5–7 DIVISORES DE VOLTAJE

Un circuito en serie actúa como divisor de voltaje. El divisor de voltaje es una aplicación importante de los circuitos en serie.

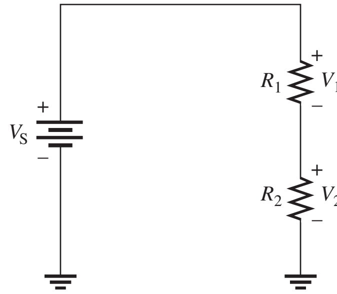
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar un circuito en serie como divisor de voltaje**
  - Aplicar la fórmula del divisor de voltaje
  - Utilizar un potenciómetro como divisor de voltaje ajustable
  - Describir algunas aplicaciones del divisor de voltaje

Un circuito compuesto a partir de una serie de resistores conectada a una fuente de voltaje actúa como **divisor de voltaje**. La figura 5-37 muestra un circuito con dos resistores en serie, aunque puede haber cualquier cantidad. Existen dos caídas de voltaje en los resistores: una en R_1 y

▶ **FIGURA 5–37**

Divisor de voltaje con dos resistores.



una en R_2. Estas caídas de voltaje son V_1 y V_2, respectivamente, como indica el diagrama esquemático. Dado que cada resistor tiene la misma corriente, las caídas de voltaje son proporcionales a los valores de resistencia. Por ejemplo, si el valor de R_2 es dos veces el de R_1, entonces el valor de V_2 es dos veces el valor de V_1.

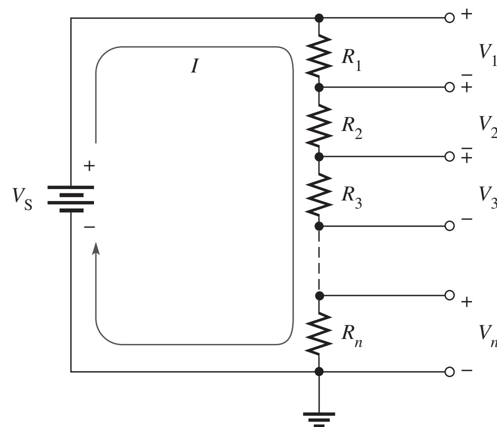
La caída de voltaje total localizada en una trayectoria cerrada única se divide entre los resistores en serie en cantidades directamente proporcionales a los valores de resistencia. Por ejemplo, en la figura 5-37, si V_S es de 10 V, R_1 de 50 Ω, y R_2 de 100 Ω, entonces V_1 es un tercio del voltaje total, o 3.33 V, porque R_1 vale un tercio de la resistencia total de 150 Ω. Asimismo, V_2 es dos tercios de V_S, o 6.67 V.

Fórmula del divisor de voltaje

Con pocos cálculos, se puede desarrollar una fórmula para determinar cómo se dividen los voltajes entre resistores en serie. Suponga un circuito con *n* resistores en serie como se muestra en la figura 5-38, donde *n* puede ser cualquier número.

▶ **FIGURA 5–38**

Divisor de voltaje generalizado con *n* resistores.



Sean V_x la caída de voltaje a través de cualquiera de los resistores y R_x el número de un resistor en particular o de una combinación de resistores. Con la ley de Ohm, se puede expresar la caída de voltaje en R_x como sigue:

$$V_x = IR_x$$

La corriente que circula por el circuito es igual al voltaje de la fuente dividido entre la resistencia total ($I = V_S/R_T$). En el circuito de la figura 5-38, la resistencia total es $R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$. Sustituyendo I por V_S/R_T en la expresión para V_x,

$$V_x = \left(\frac{V_S}{R_T}\right)R_x$$

Al reordenar los términos se obtiene

Ecuación 5–5

$$V_x = \left(\frac{R_x}{R_T}\right)V_S$$

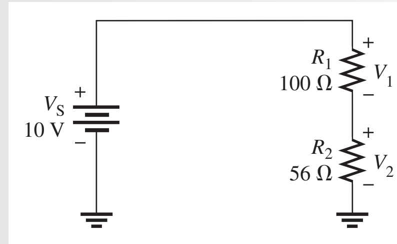
La ecuación 5-5 es la fórmula general del divisor de voltaje, la cual se establece como sigue:

La caída de voltaje a través de cualquier resistor o combinación de resistores en un circuito en serie es igual a la relación de dicho valor de resistencia a la resistencia total, multiplicada por el voltaje de fuente.

EJEMPLO 5–16

Determine V_1 (el voltaje a través de R_1) y V_2 (la caída de voltaje en R_2) en el divisor de voltaje de la figura 5-39.

▶ FIGURA 5–39



Solución Para determinar V_1, use la fórmula del divisor de voltaje, $V_x = (R_x/R_T)V_S$, donde $x = 1$. La resistencia total es

$$R_T = R_1 + R_2 = 100\ \Omega + 56\ \Omega = 156\ \Omega$$

R_1 es de 100 Ω y V_S de 10 V. Sustituya estos valores en la fórmula del divisor de voltaje.

$$V_1 = \left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{156\ \Omega}\right)10\ \text{V} = \mathbf{6.41\ V}$$

Existen dos formas de determinar el valor de V_2: la ley del voltaje de Kirchhoff o la fórmula del divisor de voltaje. Si utiliza la ley del voltaje de Kirchhoff ($V_S = V_1 + V_2$), sustituya los valores de V_S y V_1 como sigue:

$$V_2 = V_S - V_1 = 10\ \text{V} - 6.41\ \text{V} = \mathbf{3.59\ V}$$

Para determinar V_2 se utiliza la fórmula del divisor de voltaje, donde $x = 2$.

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{56\ \Omega}{156\ \Omega}\right)10\ \text{V} = \mathbf{3.59\ V}$$

Problema relacionado Encuentre los voltajes a través de R_1 y R_2 en la figura 5-39 si R_2 cambia a 180 Ω.

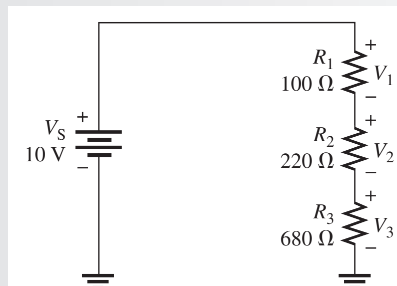


Use el archivo Multisim E05-16 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

EJEMPLO 5–17

Calcule la caída de voltaje a través de cada resistor dispuesto en el divisor de voltaje mostrado en la figura 5-40.

▶ FIGURA 5–40



Solución Examine el circuito durante unos momentos y considere lo siguiente. La resistencia total es de 1000 Ω. Un diez por ciento del voltaje total se encuentra a través de R_1 porque es el 10% de la resistencia total (100 Ω es el 10% de 1000 Ω). Asimismo, el 22% del voltaje total se encuentra a través de R_2 porque es el 22% de la resistencia total (220 Ω es el 22% de 1000 Ω). Por último, R_3 cae al 68% de la resistencia total porque 680 Ω es el 68% de 1000 Ω.

Debido a los convenientes valores dados en este problema, resulta fácil calcular los voltajes mentalmente. ($V_1 = 0.10 \times 10\text{ V} = 1\text{ V}$, $V_2 = 0.22 \times 10\text{ V} = 2.2\text{ V}$, y $V_3 = 0.68 \times 10\text{ V} = 6.8\text{ V}$). Lo anterior no siempre es el caso, pero en ocasiones un poco de razonamiento dará un resultado más eficientemente y eliminará algunos cálculos. Esta es también una buena manera de estimar cuáles serían los resultados de modo que se reconozca una respuesta poco razonable a consecuencia de un error de cálculo.

Aunque usted ya razonó este problema, los cálculos comprobarán sus resultados.

$$V_1 = \left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{1000\ \Omega}\right)10\text{ V} = \mathbf{1\ V}$$

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{220\ \Omega}{1000\ \Omega}\right)10\text{ V} = \mathbf{2.2\ V}$$

$$V_3 = \left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{680\ \Omega}{1000\ \Omega}\right)10\text{ V} = \mathbf{6.8\ V}$$

Observe que la suma de las caídas de voltaje es igual al voltaje de fuente, de acuerdo con la ley del voltaje de Kirchhoff. Esta comprobación es una buena manera de verificar sus resultados.

Problema relacionado Si los R_1 y R_2 presentados en la figura 5-40 cambian a 680 Ω, ¿cuáles son las caídas de voltaje?

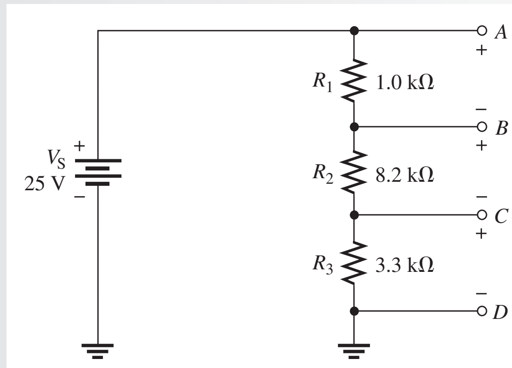


Use el archivo Multisim E05-17 para comprobar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

EJEMPLO 5–18 Determine los voltajes entre los siguientes puntos en el divisor de voltaje de la figura 5-41:

(a) *A* a *B* **(b)** *A* a *C* **(c)** *B* a *C* **(d)** *B* a *D* **(e)** *C* a *D*

▶ **FIGURA 5–41**



Solución Primero, determine R_T

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 = 1.0\text{ k}\Omega + 8.2\text{ k}\Omega + 3.3\text{ k}\Omega = 12.5\text{ k}\Omega$$

A continuación, aplique la fórmula del divisor de voltaje para obtener cada voltaje requerido.

(a) El voltaje de A a B es la caída de voltaje a través de R_1.

$$V_{AB} = \left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{1.0\text{ k}\Omega}{12.5\text{ k}\Omega}\right)25\text{ V} = \mathbf{2\text{ V}}$$

(b) El voltaje de A a C es la caída de voltaje a través tanto de R_1 como de R_2. En este caso, en la fórmula general dada en la ecuación 5-5, R_x es $R_1 + R_2$.

$$V_{AC} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{9.2\text{ k}\Omega}{12.5\text{ k}\Omega}\right)25\text{ V} = \mathbf{18.4\text{ V}}$$

(c) El voltaje de B a C es la caída de voltaje a través de R_2.

$$V_{BC} = \left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{8.2\text{ k}\Omega}{12.5\text{ k}\Omega}\right)25\text{ V} = \mathbf{16.4\text{ V}}$$

(d) El voltaje de B a D es la caída de voltaje combinada a través tanto de R_2 como de R_3. En este caso, en la fórmula general, R_x es $R_2 + R_3$.

$$V_{BD} = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{11.5\text{ k}\Omega}{12.5\text{ k}\Omega}\right)25\text{ V} = \mathbf{23\text{ V}}$$

(e) Por último, el voltaje de C a D es la caída de voltaje a través de R_3.

$$V_{CD} = \left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{3.3\text{ k}\Omega}{12.5\text{ k}\Omega}\right)25\text{ V} = \mathbf{6.6\text{ V}}$$

Si conecta este divisor de voltaje, puede comprobar cada uno de los voltajes calculados conectando un voltímetro entre los puntos apropiados en cada caso.

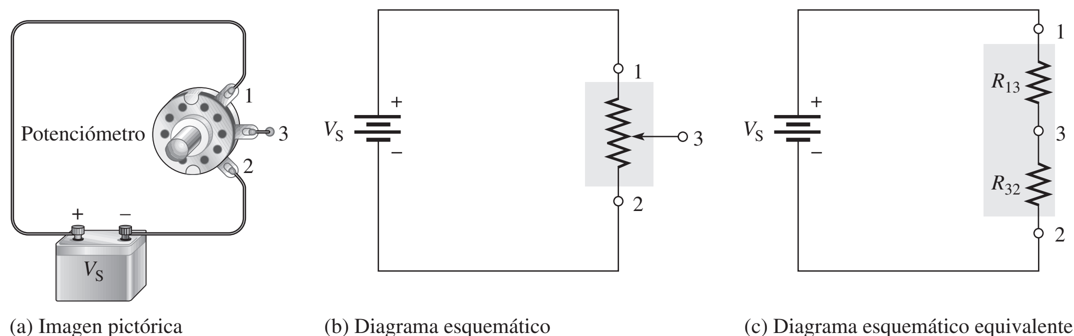
Problema relacionado Determine cada uno de los voltajes previamente calculados si V_S se duplica.



Use el archivo Multisim E05-18 para comprobar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

Un potenciómetro como divisor de voltaje ajustable

Del capítulo 2, recuerde que un potenciómetro es un resistor variable con tres terminales. En la figura 5-42(a) se muestra un potenciómetro conectado a una fuente de voltaje con el diagrama esquemático ilustrado en la parte (b). Observe que las dos terminales extremas están marcadas con 1 y 2. La terminal ajustable o contacto deslizable lleva el número 3. El potenciómetro funciona

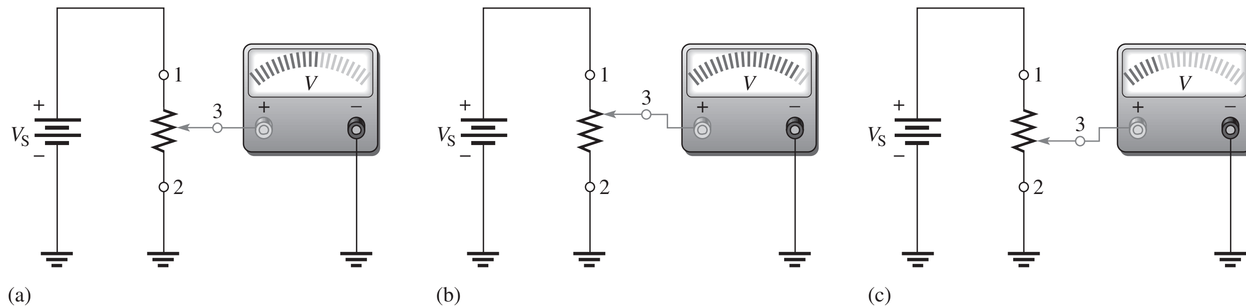


▲ **FIGURA 5–42**

Potenciómetro utilizado como divisor de voltaje.

como divisor de voltaje, lo cual puede ser ilustrado separando la resistencia total en dos partes, según indica la figura 5-42(c). La resistencia entre la terminal 1 y la terminal 3 (R_{13}) es una parte, y la resistencia entre la terminal 3 y la terminal 2 (R_{32}) es la otra parte. Así que este potenciómetro equivale a un divisor de voltaje de dos resistores que puede ser ajustado manualmente.

La figura 5-43 muestra lo que sucede cuando el contacto deslizable (3) se mueve. En la parte (a), el contacto deslizable está exactamente en el centro, lo cual iguala a las dos resistencias. Al medir el voltaje a través de las terminales 3 a 2 como se indica mediante el símbolo de voltímetro, se tiene la mitad del voltaje de fuente. Cuando el contacto deslizable sube, como en la parte (b), la resistencia entre las terminales 3 y 2 se incrementa y el voltaje a través de ella aumenta proporcionalmente. Cuando el contacto deslizable baja, como en la parte (c), la resistencia entre las terminales 3 y 2 disminuye, y el voltaje disminuye proporcionalmente.

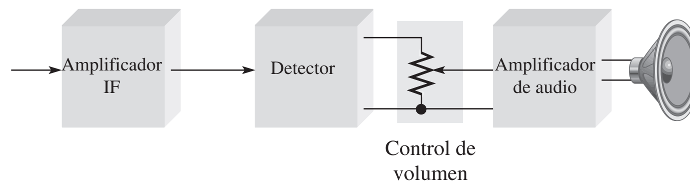


▲ **FIGURA 5–43**

Ajuste del divisor de voltaje.

Aplicaciones

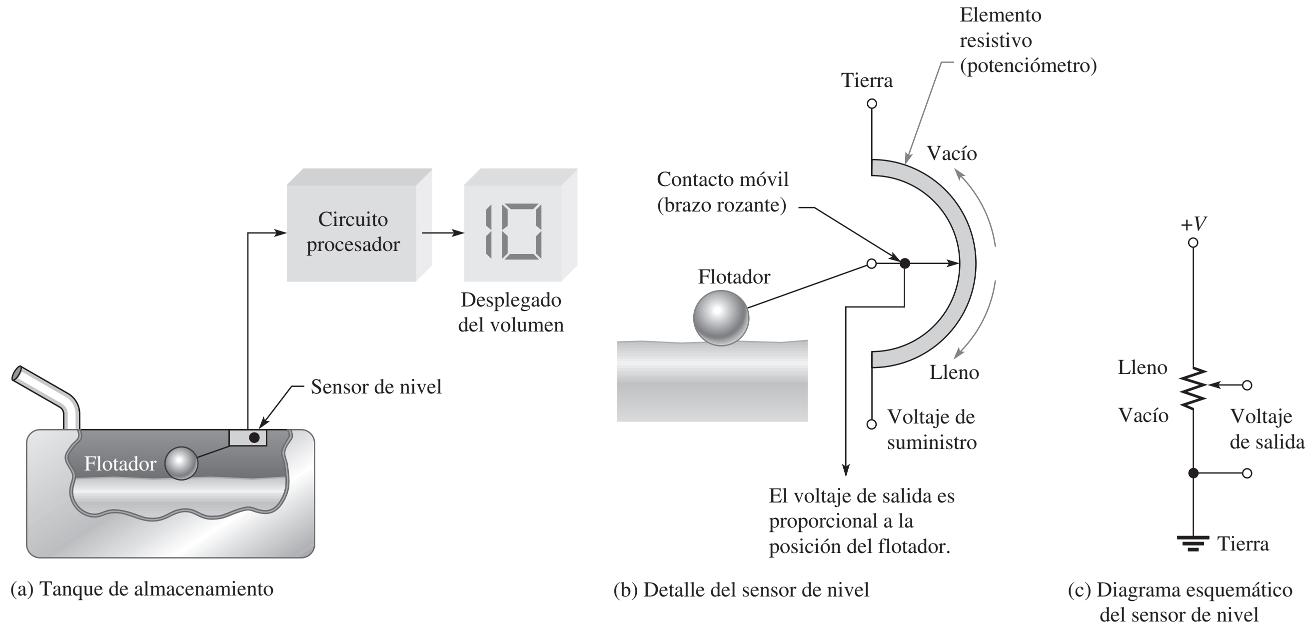
El control de volumen de los receptores de radio o televisión es una aplicación común de un potenciómetro utilizado como divisor de voltaje. Como el volumen del sonido depende de la cantidad de voltaje asociado con la señal de audio, se puede incrementar o disminuir el volumen ajustando el potenciómetro, es decir, girando la perilla del control de volumen en el aparato. El diagrama de bloques de la figura 5-44 muestra la forma en que se puede utilizar un potenciómetro como control de volumen en un receptor típico.



▲ **FIGURA 5–44**

Divisor de voltaje variable utilizado para controlar el volumen en un receptor de radio.

Otra aplicación de un divisor de voltaje se ilustra en la figura 5-45, la cual describe un divisor de voltaje potenciómetro como sensor de nivel en un tanque de almacenamiento de líquido. Tal como indica la parte (a), el flotador sube conforme el tanque se va llenando y baja conforme se vacía. El flotador está unido mecánicamente al brazo rozador de un potenciómetro, según muestra la parte (b). El voltaje de salida varía proporcionalmente con la posición del brazo deslizable. Conforme el líquido disminuye en el tanque, el voltaje de salida del sensor también disminuye. El voltaje de salida se dirige al circuito indicador, el cual controla una pantalla digital para mostrar la cantidad de líquido que hay en el tanque. El diagrama esquemático de este sistema se muestra en la parte (c).



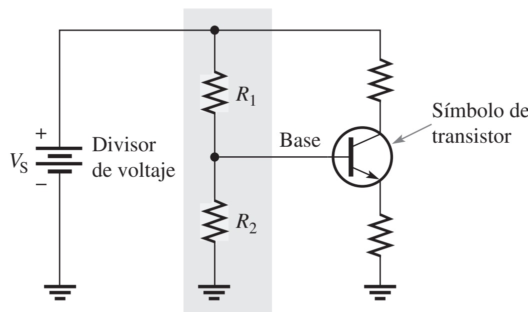
(a) Tanque de almacenamiento (b) Detalle del sensor de nivel (c) Diagrama esquemático del sensor de nivel

▲ **FIGURA 5–45**

Divisor de voltaje con potenciómetro utilizado en un sensor de nivel.

Otra aplicación más de los divisores de voltaje es el ajuste del voltaje operativo de cd (polarización) en amplificadores transistorizados. La figura 5-46 muestra un divisor de voltaje utilizado para este propósito. Los amplificadores transistorizados y la polarización se estudiarán en un curso posterior, por lo cual es importante que en este punto se entiendan a cabalidad los fundamentos de los divisores de voltaje.

Estos ejemplos son sólo tres de entre muchas aplicaciones posibles de los divisores de voltaje.



◀ **FIGURA 5–46**

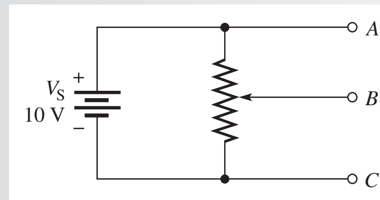
Divisor de voltaje utilizado como circuito polarizador en un amplificador transistorizado, donde el divisor de voltaje determina el voltaje en la base del transistor como $V_{base} = (R_2/(R_1 + R_2))V_S$.

REPASO DE LA SECCIÓN 5-7

1. ¿Qué es un divisor de voltaje?
2. ¿Cuántos resistores puede haber en un circuito divisor de voltaje dispuesto en serie?
3. Escriba la fórmula general de los divisores de voltaje.
4. Si dos resistores de igual valor se conectan en serie entre las terminales de una fuente de 10 V, ¿cuánto voltaje hay a través de cada resistor?
5. Un resistor de 47 kΩ y otro de 82 kΩ se conectan como un divisor de voltaje. El voltaje de la fuente es de 100 V. Trace el circuito, y determine el voltaje en cada uno de los resistores.

6. El circuito de la figura 5-47 es un divisor de voltaje ajustable. Si el potenciómetro es lineal, ¿dónde colocaría usted el contacto deslizante para obtener 5 V de *A* a *B* y 5 V de *B* a *C*?

▶ FIGURA 5–47



5–8 POTENCIA EN CIRCUITOS EN SERIE

La potencia disipada por cada resistor en un circuito dispuesto en serie contribuye a la potencia total presente en el circuito. Las potencias individuales son aditivas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la potencia presente en un circuito en serie**
  - Aplicar una de las fórmulas de potencia

La cantidad total de potencia presente en un circuito resistivo dispuesto en serie es igual a la suma de potencias de cada resistor en serie.

Ecuación 5–6

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$$

donde P_T es la potencia total y P_n es la potencia en el último resistor en serie.

Las fórmulas de potencia aprendidas en el capítulo 4 son aplicables a circuitos en serie. Como existe la misma corriente a través de cada resistor dispuesto en serie, se utilizan las fórmulas siguientes para calcular la potencia total

$$P_T = V_S I$$

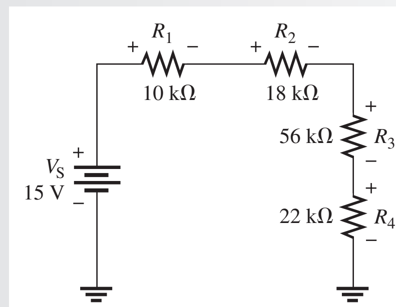
$$P_T = I^2 R_T$$

$$P_T = \frac{V_S^2}{R_T}$$

donde I es la corriente a través del circuito, V_S es el voltaje de fuente total de la conexión en serie, y R_T es la resistencia total.

EJEMPLO 5–19 Determine la cantidad total de potencia presente en el circuito en serie de la figura 5-48.

▶ FIGURA 5–48



Solución El voltaje de fuente es de 15 V. La resistencia total es

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 10\ \Omega + 18\ \Omega + 56\ \Omega + 22\ \Omega = 106\ \Omega$$

La fórmula más fácil de utilizar es $P_T = V_S^2/R_T$ puesto que V_S y R_T son conocidos.

$$P_T = \frac{V_S^2}{R_T} = \frac{(15\text{ V})^2}{106\ \Omega} = \frac{225\text{ V}^2}{106\ \Omega} = 2.12\text{ W}$$

Si la potencia presente en cada resistor se determina por separado y todas esas potencias se suman, obtenemos el mismo resultado. En primer lugar, encuentre la corriente.

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{15\text{ V}}{106\ \Omega} = 142\text{ mA}$$

A continuación, calcule la potencia presente en cada resistor con $P = I^2R$.

$$P_1 = I^2R_1 = (142\text{ mA})^2(10\ \Omega) = 200\text{ mW}$$
$$P_2 = I^2R_2 = (142\text{ mA})^2(18\ \Omega) = 360\text{ mW}$$
$$P_3 = I^2R_3 = (142\text{ mA})^2(56\ \Omega) = 1.12\text{ W}$$
$$P_4 = I^2R_4 = (142\text{ mA})^2(22\ \Omega) = 441\text{ mW}$$

En seguida, sume estas potencias para obtener la potencia total.

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 200\text{ mW} + 360\text{ mW} + 1.12\text{ W} + 441\text{ mW} = \mathbf{2.12\ W}$$

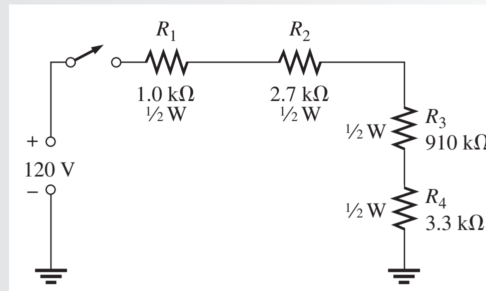
Este resultado se compara con la potencia total, igual que se determinó previamente aplicando la fórmula $P_T = V_S^2/R_T$.

Problema relacionado ¿Cuál es la potencia presente en el circuito de la figura 5-48 si V_S se incrementa a 30 V?

Conocer la cantidad de potencia presente en un resistor es importante porque el valor nominal de potencia de los resistores debe ser lo suficientemente alta como para manejar la potencia esperada en el circuito. El siguiente ejemplo ilustra consideraciones prácticas relacionadas con la potencia presente en un circuito en serie.

EJEMPLO 5–20 Determine si el valor nominal de potencia indicada (1/2 W) en cada resistor que aparece en la figura 5-49 es suficiente para manejar la potencia real. Si el valor nominal no es adecuada, especifique la capacidad mínima requerida.

▶ **FIGURA 5–49**



Solución Primero, determine la resistencia total.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 1.0\text{ k}\Omega + 2.7\text{ k}\Omega + 910\ \Omega + 3.3\text{ k}\Omega = 7.91\text{ k}\Omega$$

A continuación, calcule la corriente.

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{120\text{ V}}{7.91\text{ k}\Omega} = 15\text{ mA}$$

En seguida calcule la potencia presente en cada resistor.

$$P_1 = I^2R_1 = (15\text{ mA})^2(1.0\text{ k}\Omega) = \mathbf{225\text{ mW}}$$
$$P_2 = I^2R_2 = (15\text{ mA})^2(2.7\text{ k}\Omega) = \mathbf{608\text{ mW}}$$
$$P_3 = I^2R_3 = (15\text{ mA})^2(910\ \Omega) = \mathbf{205\text{ mW}}$$
$$P_4 = I^2R_4 = (15\text{ mA})^2(3.3\text{ k}\Omega) = \mathbf{743\text{ mW}}$$

La capacidad de R_2 y R_4 no es suficiente para manejar la potencia existente, la cual excede de ½W en cada uno de estos resistores y pueden quemarse si el interruptor se cierra. Estos resistores deben ser reemplazados por resistores de 1 W.

Problema relacionado Determine el valor nominal de potencia mínima requerida para cada uno de los resistores mostrados en la figura 5-49 si el voltaje de fuente se incrementa a 240 V.

REPASO DE LA SECCIÓN 5-8

1. **Si usted conoce la potencia presente en cada resistor dispuesto en un circuito en serie, ¿cómo puede calcular la potencia total?**
2. **Los resistores de un circuito en serie disipan las siguientes potencias: 2 W, 5 W, 1 W, y 8 W. ¿Cuál es la potencia total presente en el circuito?**
3. **Un circuito tiene un resistor de 100 Ω, uno de 330 Ω, y otro de 680 Ω en serie. A través del circuito circula una corriente de 1 A. ¿Cuál es la potencia total?**

5–9 MEDICIONES DE VOLTAJE

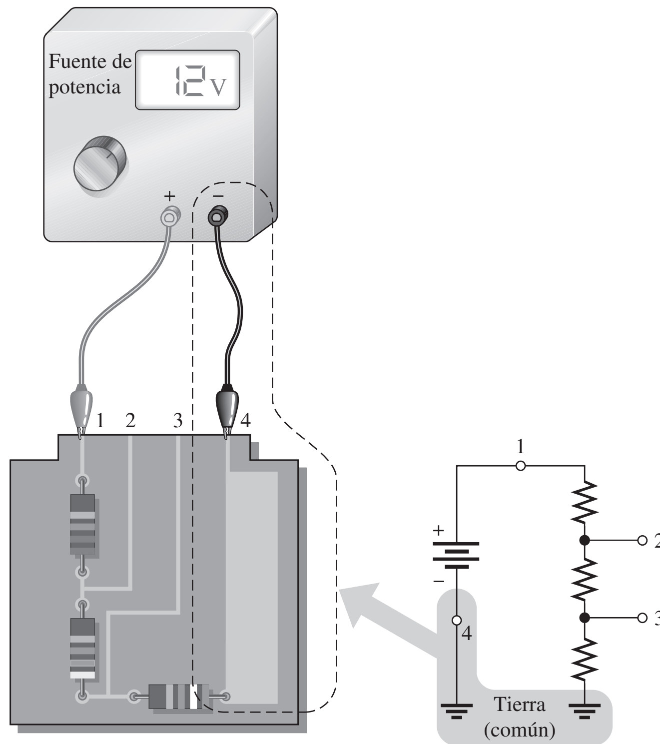
El voltaje es relativo. Es decir, en un punto de un circuito, el voltaje siempre se mide con respecto a otro punto. Por ejemplo, cuando se declara que hay +100 V en cierto punto de un circuito, esto significa que el punto está 100 V más positivo que algún otro punto de referencia designado en el circuito. Este punto de referencia se llama tierra o punto común.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Medir el voltaje con respecto a tierra**
  - Determinar e identificar la tierra en un circuito
  - Definir el término *tierra de referencia*

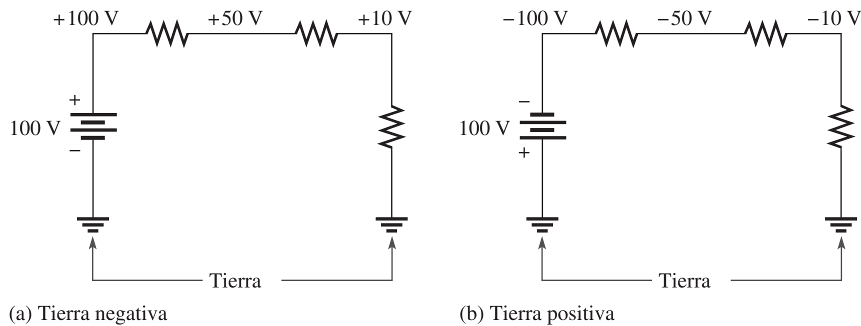
El concepto de *tierra* se introdujo en el capítulo 2. En la mayor parte del equipo electrónico se utiliza como **tierra de referencia** o **común** una gran área conductiva de una tarjeta de circuito impreso o la caja metálica, según ilustra la figura 5-50.

La tierra de referencia tiene un potencial de cero volts (0 V) con respecto a todos los demás puntos del circuito relacionados, como ilustra la figura 5-51. En la parte (a), el lado negativo de la fuente está conectado a tierra, y todos los voltajes indicados son positivos con respecto a tierra. En la parte (b), el lado positivo de la fuente es la tierra. En todos los demás puntos los voltajes son, por consiguiente, negativos con respecto a tierra. Recuerde que todos los puntos mostrados conectados a tierra en un circuito están conectados entre sí mediante la tierra y, eléctricamente, son el mismo punto.



▲ **FIGURA 5–50**

Ilustración simple de tierra en un circuito.



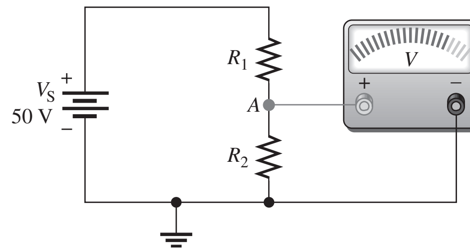
▲ **FIGURA 5–51**

Ejemplo de tierras negativa y positiva.

Medición de voltajes con respecto a tierra

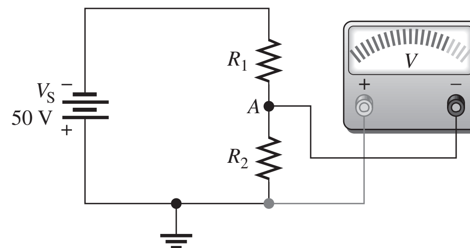
Cuando se miden voltajes con respecto a la tierra de referencia en un circuito, un conector del medidor se conecta a la tierra de referencia y el otro al punto donde se va a medir el voltaje. En un circuito con tierra negativa, como el ilustrado en la figura 5-52, la terminal negativa del medidor se conecta a la tierra de referencia. La terminal positiva del voltímetro se conecta entonces al punto de voltaje positivo. El medidor lee el voltaje positivo en el punto *A* con respecto a tierra.

En un circuito con tierra positiva, el conector positivo del voltímetro se conecta a la tierra de referencia y el conector negativo al punto de voltaje negativo, como indica la figura 5-53. Aquí el medidor lee el voltaje negativo en el punto *A* con respecto a tierra.



▲ **FIGURA 5–52**

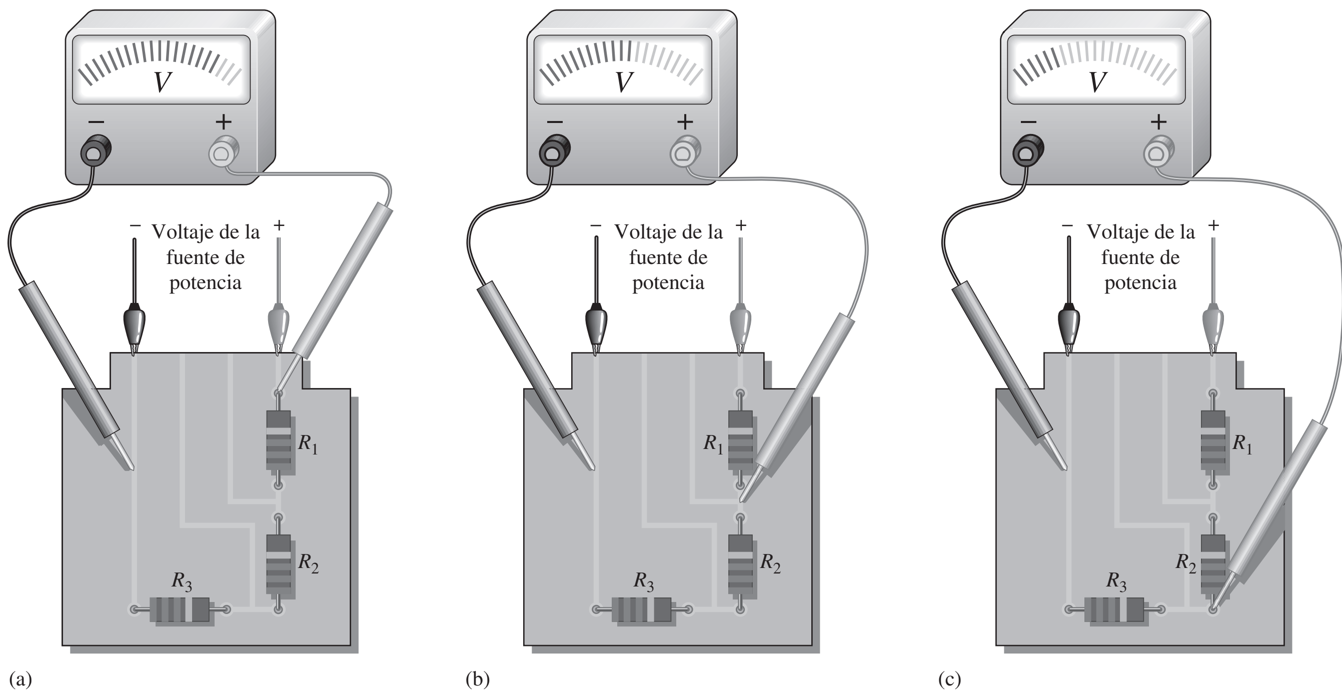
Medición de voltaje con respecto a tierra negativa.



▲ **FIGURA 5–53**

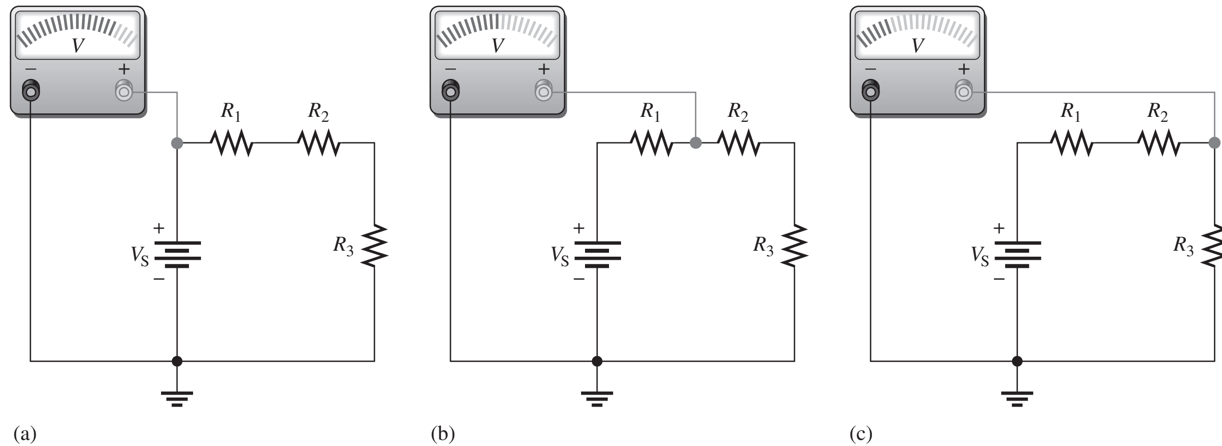
Medición de voltaje con respecto a tierra positiva.

Cuando se miden voltajes en varios puntos de un circuito, se puede conectar el conector de tierra a un punto del circuito y dejarlo allí. Luego se mueve el otro conector de punto en punto al medir los voltajes. Este método se ilustra pictóricamente en la figura 5-54 y en forma esquemática equivalente en la figura 5-55.



▲ **FIGURA 5–54**

Medición de voltajes en varios puntos de un circuito con respecto a tierra.

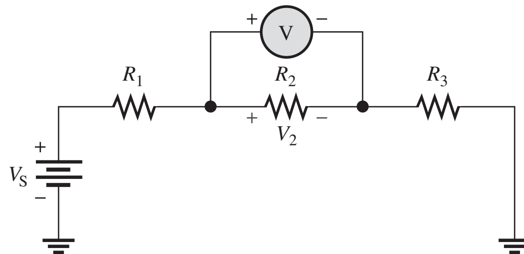


▲ **FIGURA 5–55**

Diagrama esquemático equivalente para la figura 5-54.

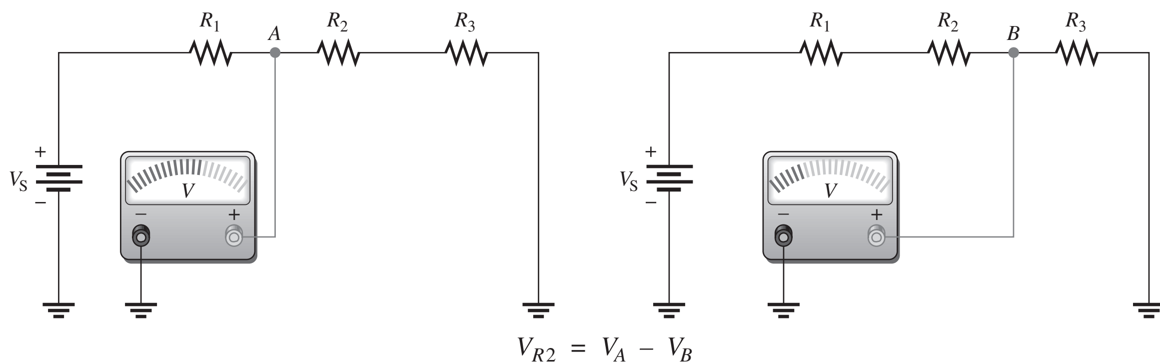
Medición de voltaje a través de un resistor no conectado a tierra

El voltaje se puede medir normalmente a través de un resistor, como indica la figura 5-56, aun cuando ningún lado del resistor esté conectado a tierra. Si el instrumento de medición no está aislado de la tierra de la línea de potencia, el conductor negativo del medidor conectará a tierra un lado del resistor y modificará la operación del circuito. En esta situación, se debe utilizar otro método, tal como ilustra la figura 5-57. Se mide el voltaje en cada lado del resistor con respecto a tierra. La diferencia entre estas dos mediciones representa la caída de voltaje del resistor.



▲ **FIGURA 5–56**

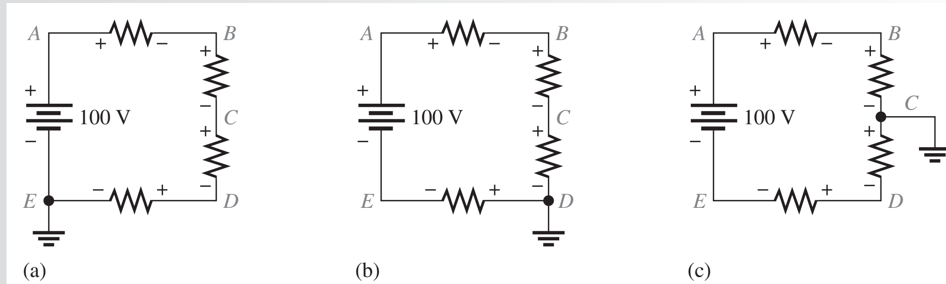
Medición de voltaje entre los extremos de un resistor.



▲ **FIGURA 5–57**

Medición de voltaje entre los extremos de R_2 con dos mediciones distintas con respecto a tierra. Observe que $V_A - V_B$ puede ser expresado como V_{AB}, donde el segundo subíndice, B, es la referencia.

EJEMPLO 5–21 Determine los voltajes con respecto a tierra para cada uno de los puntos indicados en los circuitos de la figura 5-58. Suponga que hay una caída de voltaje de 25 V entre los extremos de cada resistor.



▲ **FIGURA 5–58**

Solución En el circuito (a), las polaridades del voltaje son las mostradas. El punto *E* es tierra. Los subíndices de una sola letra denotan voltaje en un punto con respecto a tierra. Los voltajes con respecto a tierra son como sigue:

$$V_E = \mathbf{0\ V}, \quad V_D = \mathbf{+25\ V}, \quad V_C = \mathbf{+50\ V}, \quad V_B = \mathbf{+75\ V}, \quad V_A = \mathbf{+100\ V}$$

En el circuito (b), las polaridades del voltaje son las mostradas. El punto *D* es tierra. Los voltajes con respecto a tierra son los siguientes:

$$V_E = \mathbf{-25\ V}, \quad V_D = \mathbf{0\ V}, \quad V_C = \mathbf{+25\ V}, \quad V_B = \mathbf{+50\ V}, \quad V_A = \mathbf{+75\ V}$$

En el circuito (c), las polaridades del voltaje son las mostradas. El punto *C* es tierra. Los voltajes con respecto a tierra son los siguientes:

$$V_E = \mathbf{-50\ V}, \quad V_D = \mathbf{-25\ V}, \quad V_C = \mathbf{0\ V}, \quad V_B = \mathbf{+25\ V}, \quad V_A = \mathbf{+50\ V}$$

Problema relacionado Si la tierra de referencia está en el punto *A* en el circuito que muestra la figura 5-58, ¿cuáles son los voltajes en cada uno de los puntos con respecto a tierra?

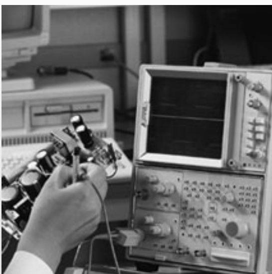


Use el archivo Multisim E05-21 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 5-9

1. **¿Qué nombre recibe el punto de referencia en un circuito?**
2. **Los voltajes en un circuito en general se refieren a tierra.** (F o V)
3. **La caja o el chasis a menudo se utilizan como tierra de referencia.** (F o V)

5–10 LOCALIZACIÓN DE FALLAS



Los resistores o contactos abiertos y un punto en cortocircuito con otro son problemas comunes que se presentan en todos los circuitos, incluidos los circuitos en serie.

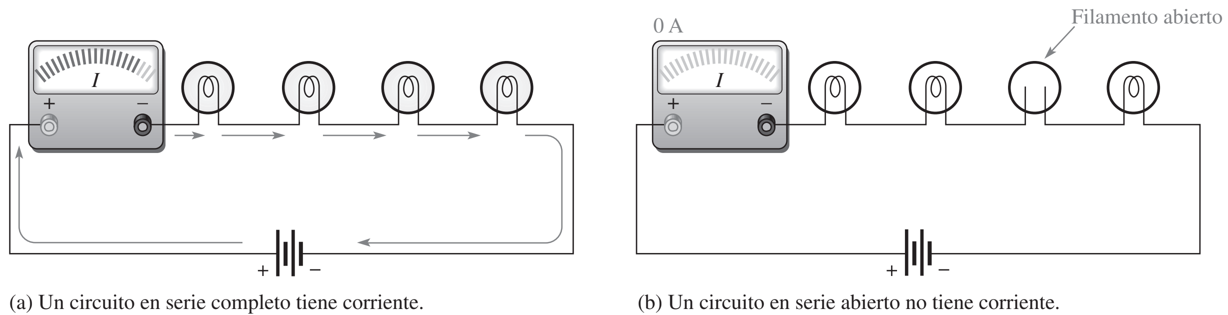
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Localizar fallas en circuitos en serie**
  - Verificar un circuito en busca de un circuito abierto
  - Verificar un circuito en busca de un corto circuito
  - Identificar las principales causas de aberturas y cortos

Circuito abierto

La falla más común que se presenta en un circuito en serie es una **abertura**. Por ejemplo, cuando un resistor o un foco se funden, provocan una ruptura en la trayectoria de la corriente y crean un circuito abierto, como ilustra la figura 5-59.

En un circuito en serie, una abertura impide el paso de corriente.



▲ **FIGURA 5–59**

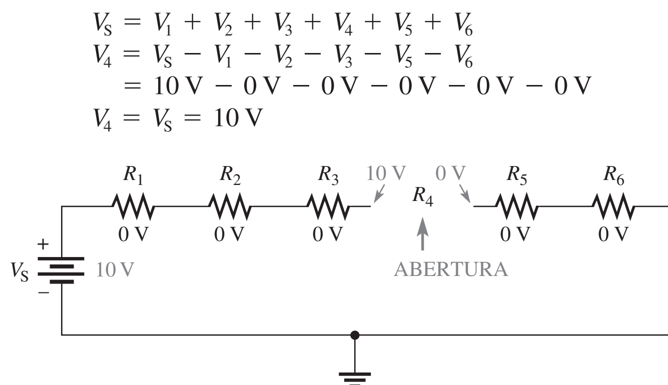
La corriente cesa cuando se presenta una abertura.

Localización de una abertura En el capítulo 3 se introdujo el método de análisis, planificación y medición (APM) para localización de fallas. También se aprendió acerca del método de división a la mitad, y se vio un ejemplo que utiliza un ohmmetro. Ahora se aplicarán los mismos principios utilizando mediciones de voltaje en lugar de mediciones de resistencia. Como es sabido, las mediciones de voltaje en general son las más fáciles de realizar porque no se tiene que desconectar nada.

Como primer paso, antes del análisis, es buena idea realizar una verificación visual del circuito defectuoso. De vez en cuando, de este modo se puede encontrar un resistor quemado, un filamento de lámpara roto, un alambre suelto o una conexión suelta. Sin embargo, es posible (y probablemente más común) que un resistor u otro componente se abra sin que muestre signos visibles del daño. Cuando un examen visual no revela nada, entonces se prosigue con el método APM.

Cuando se abre un circuito en serie, *todo el voltaje de la fuente aparece a través de la abertura*. Esto ocurre para evitar que la corriente fluya a través de todo el circuito en serie. Sin corriente, no puede haber caída de voltaje en cualquiera de los demás resistores (o en otro componente). Como $IR = (0\text{ A})R = 0\text{ V}$, el voltaje en cada extremo de un resistor en buen estado es el mismo. Por consiguiente, el voltaje aplicado a través de una conexión en serie también aparece a través del componente abierto porque no hay otras caídas de voltaje en el circuito, como ilustra la figura 5-60. El voltaje de la fuente aparecerá a través del resistor abierto, de acuerdo con la ley del voltaje de Kirchhoff, como sigue:

$$V_S = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6$$
$$V_4 = V_S - V_1 - V_2 - V_3 - V_5 - V_6$$
$$= 10\text{ V} - 0\text{ V} - 0\text{ V} - 0\text{ V} - 0\text{ V} - 0\text{ V}$$
$$V_4 = V_S = 10\text{ V}$$



▲ **FIGURA 5–60**

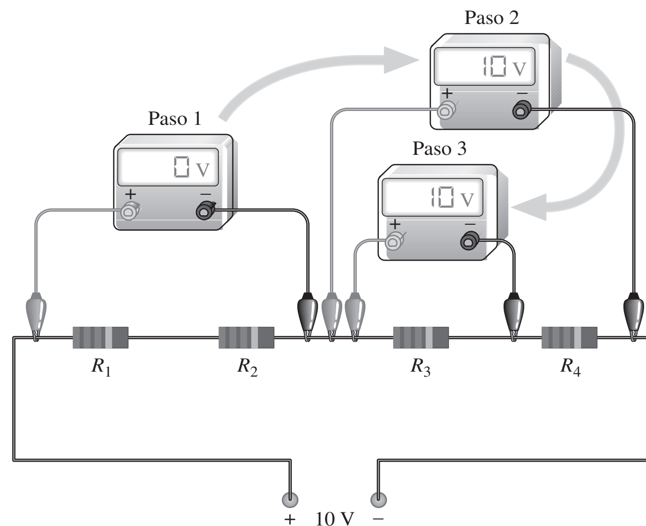
El voltaje de la fuente aparece entre los extremos del resistor en serie abierto.

Ejemplo de división a la mitad utilizando mediciones de voltaje Supongamos que un circuito tiene cuatro resistores en serie. Se ha determinado, por *análisis* de los síntomas (hay voltaje pero no corriente), que uno de los resistores está abierto, y se está *planeando* localizar el resistor abierto utilizando un voltímetro para *medir* mediante el método de división a la mitad. En la figura 5-61 se ilustra una secuencia de mediciones para este caso en particular.

Paso 1. Medir a través de R_1 y R_2 (la mitad izquierda del circuito). Una lectura de 0 V indica que ninguno de estos resistores está abierto.

Paso 2. Cambiar de lugar el medidor para medir a través de R_3 y R_4; la lectura es de 10 V. Ésta indica que existe una abertura en la mitad derecha del circuito, así que R_3 o R_4 es el resistor defectuoso (suponga que no hay conexiones en mal estado).

Paso 3. Cambiar de lugar el medidor para medir a través de R_3. Una medición de 10 V en R_3 lo identifica como el resistor abierto. Si se hubiera medido en R_4, habrían resultado 0 V. Esto habría identificado también a R_3 como el componente defectuoso porque sería el único del lado izquierdo que podría tener 10 V.



▲ **FIGURA 5–61**

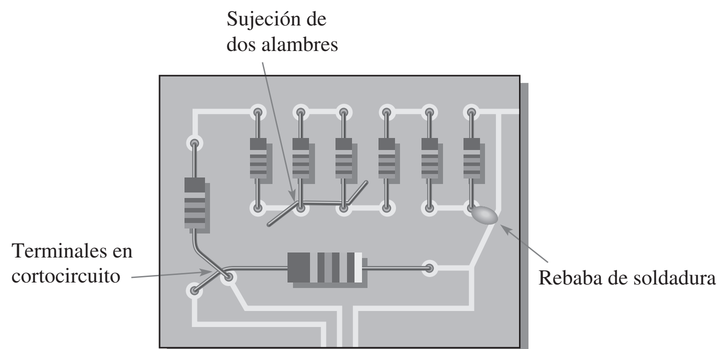
Localización de una abertura en un circuito en serie mediante división a la mitad.

Cortocircuito

En ocasiones ocurre un cortocircuito indeseable cuando dos elementos conductores tocan un objeto extraño, tal como soldadura o por sujeción accidental de dos alambres que conectan dos secciones de un circuito. Esta situación es particularmente común en circuitos con una alta densidad de componentes. En la tarjeta de circuito impreso de la figura 5-62 se ilustran varias causas potenciales de cortocircuitos.

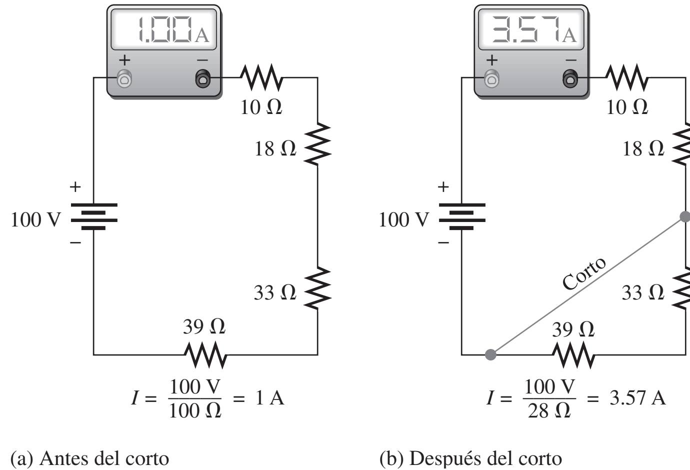
▶ **FIGURA 5–62**

Ejemplos de cortos en una tarjeta de circuito impreso.



Cuando existe un **corto**, una parte de la resistencia en serie es evitada (toda la corriente pasa por el corto), con lo que se reduce la resistencia total como se ilustra en la figura 5-63. Advierta que la corriente se incrementa a consecuencia del corto.

En un circuito en serie, un corto provoca más corriente de lo normal.



◀ **FIGURA 5–63**

Ejemplo del efecto de un corto en un circuito en serie.

Localización de un corto Un corto es muy difícil de localizar. Como en cualquier situación de localización de fallas, es una buena idea examinar visualmente el circuito defectuoso. En el caso de que haya un corto en el circuito, con frecuencia se encuentra que la causa es la sujeción de alambres, una rebaba de soldadura, o el contacto entre dos conductores. En función de la falla de un componente, los cortos son menos comunes que las aberturas en muchos tipos de componentes. Además, un corto localizado en una parte de un circuito puede provocar sobrecalentamiento en otra parte a causa de la corriente más alta que es provocada por el corto. A consecuencia de dos fallas, una abertura y un corto pueden ocurrir juntos.

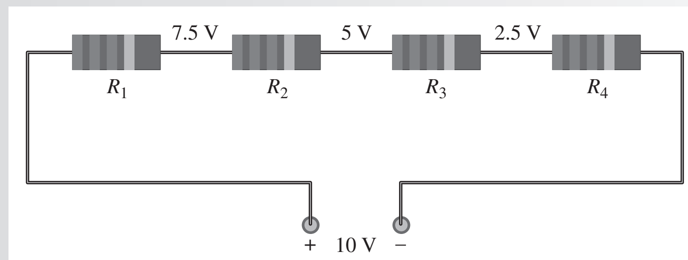
Cuando en un circuito en serie ocurre un corto, *en esencia no hay voltaje a través de la parte que está en cortocircuito.* Un corto tiene resistencia cero o casi cero, aunque de vez en cuando pueden ocurrir cortos con valores de resistencia significativos. Éstos se llaman *cortos resistivos*. Para propósitos de ilustración, se supone resistencia cero en todos los cortos.

Para localizar un corto, se mide el voltaje a través de cada resistor hasta que se tiene una lectura de 0 V. Este es el método directo y no utiliza división a la mitad. Para aplicar el método de división a la mitad, se debe conocer el voltaje correcto que hay en cada punto del circuito y compararlo con los voltajes medidos. El ejemplo 5-22 ilustra cómo se utiliza el método de división a la mitad para localizar un corto.

EJEMPLO 5–22 Suponga que ya se determinó que existe un corto en un circuito con cuatro resistores en serie porque la corriente está más alta de lo debido. Se sabe que el voltaje en cada punto del circuito debería ser como indica la figura 5-64 si el circuito estuviera trabajando apropiadamente. Los voltajes se muestran con respecto a la terminal negativa de la fuente. Localice el corto.

▶ **FIGURA 5–64**

Circuito en serie (sin corto) con los voltajes correctos indicados.

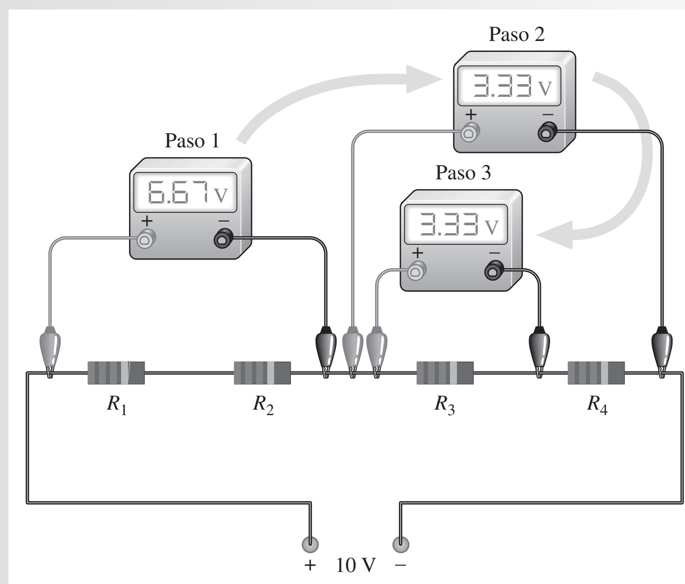


Solución Use el método de división a la mitad para localizar el corto.

Paso 1: Mida a través de R_1 y R_2. El medidor lee 6.67 V, lo cual indica un voltaje más alto de lo normal (debería ser de 5 V). Busque un voltaje más bajo de lo normal porque un corto reducirá el voltaje que pueda medirse en alguna parte del circuito.

Paso 2: Mueva el medidor y mida a través de R_3 y R_4; la lectura de 3.33 V es incorrecta y más baja de lo normal (debería ser de 5 V). Esto indica que el corto está a la derecha del circuito y que R_3 o R_4 está en cortocircuito.

Paso 3: De nuevo mueva el medidor y mida a través de R_3. Una lectura de 3.3 V a través de R_3 indica que R_4 está en cortocircuito porque ahí debe haber 0 V. La figura 5-65 ilustra esta técnica de localización de fallas.



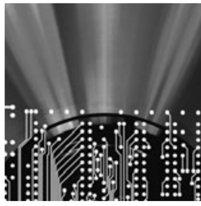
▲ **FIGURA 5–65**

Localización de un corto mediante división a la mitad.

Problema relacionado Suponga que R_1 está en cortocircuito en la figura 5-65. ¿Cuál sería la medición en el paso 1?

REPASO DE LA SECCIÓN 5-10

1. Defina el término *corto*.
2. Defina el término *abertura*.
3. ¿Qué sucede cuando un circuito en serie se abre?
4. Nombre dos formas generales en las que puede ocurrir un circuito abierto en la práctica. ¿Qué puede provocar que ocurra un cortocircuito?
5. Cuando un resistor falla, normalmente fallará por abertura. (F o V)
6. El voltaje total en una serie de resistores es de 24 V. Si uno de los resistores se abre, ¿cuánto voltaje hay a través de él? ¿Cuánto voltaje hay en cada uno de los resistores en buen estado?

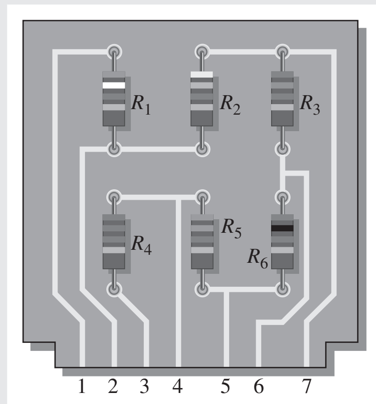


Una aplicación de circuito

En esta aplicación, usted dispone de una tarjeta de circuito divisora de voltaje para evaluar y modificar si es necesario. La utilizará para obtener cinco niveles de voltaje diferentes con una batería de 12 V y capacidad de 6.5 Ah. El divisor de voltaje proporciona voltajes de referencia a un circuito electrónico en un convertidor analógico a digital. Su trabajo es revisar el circuito para ver si proporciona los siguientes voltajes dentro de una tolerancia de ±5% con respecto al lado negativo de la batería: 10.4 V, 8.0 V, 7.3 V, 6.0 V, y 2.7 V. Si el circuito existente no proporciona los voltajes especificados, usted lo modificará para que lo haga. Asimismo, debe asegurarse de que los valores nominales de potencia de los resistores son adecuadas para la aplicación y determinar cuánto tiempo durará la batería con el divisor de voltaje conectado a ella.

El diagrama esquemático del circuito

◆ Use la figura 5-66 para determinar los valores de los resistores y trace el diagrama esquemático del circuito divisor de voltaje. Todos los resistores que hay en la tarjeta son de ¼ W.



▲ FIGURA 5–66

Los voltajes

◆ Determine el voltaje en cada punta de la tarjeta de circuito con respecto al lado negativo de la batería cuando el lado positivo de la batería de 12 V está conectado a la punta 3 y el negativo a la 1. Compare los voltajes existentes con las siguientes especificaciones:

Punta 1: terminal negativa de la batería de 12 V

Punta 2: 2.7 V ± 5%

Punta 3: terminal positiva de la batería de 12 V

Punta 4: 10.4 V ± 5%

Punta 5: 8.0 V ± 5%

Punta 6: 7.3 V ± 5%

Punta 7: 6.0 V ± 5%

◆ Si los voltajes de salida del circuito existentes no son iguales a los proporcionados en las especificaciones, realice los cambios necesarios en el circuito para satisfacerlas. Trace un diagrama esquemático del circuito modificado que muestre los valores de los resistores y los valores nominales de potencia adecuados.

La batería

◆ Determine la corriente total extraída de la batería de 12 V cuando se conecta el circuito divisor de voltaje, y calcule cuántos días durará la batería de 6.5 Ah.

Un procedimiento de prueba

◆ Determine cómo probaría usted el circuito divisor de voltaje y qué instrumentos utilizaría. En seguida detalle su procedimiento en un formato paso a paso.

Localización de fallas

◆ Determine la falla más probable en cada uno de los siguientes casos. Los voltajes son con respecto a la terminal negativa de la batería (punta 1 en la tarjeta de circuito).

1. Nada de voltaje en cualquiera de las puntas de la tarjeta de circuito
2. 12 V en las puntas 3 y 4. Todas las demás tienen 0 V.
3. 12 V en todas las puntas excepto 0 V en la punta 1
4. 12 V en la punta 6 y 0 V en la 7
5. 3.3 V en la punta 2

Repaso

1. ¿Cuál es la potencia total disipada por el circuito divisor de voltaje mostrado en la figura 5-66 con una batería de 12 V?
2. ¿Cuáles son los voltajes de salida producidos por el divisor de voltaje si la terminal positiva de una batería de 6 V se conecta a la punta 3 y la terminal negativa a la punta 1?
3. Cuando la tarjeta divisora de voltaje se conecta a un circuito electrónico al cual se le están proporcionando voltajes de referencia positivos, ¿cuál punta de la tarjeta debe conectarse a la tierra del circuito electrónico?

RESUMEN

- La corriente es la misma en todos los puntos de un circuito en serie.
- La resistencia total en serie es la suma de todos los resistores presentes en el circuito en serie.
- La resistencia total entre dos puntos cualesquiera de un circuito en serie es igual a la suma de todos los resistores conectados entre esos dos puntos.
- Si todos los resistores presentes en un circuito en serie son de igual valor, la resistencia total es la cantidad de resistores multiplicada por el valor de resistencia de un resistor.
- Las fuentes de voltaje en serie se suman algebraicamente.
- Ley del voltaje de Kirchhoff: La suma de todas las caídas de voltaje localizadas en una trayectoria cerrada de un circuito es igual al voltaje total de fuente en dicha trayectoria.
- Ley del voltaje de Kirchhoff: La suma algebraica de todos los voltajes (tanto de fuente como caídas) localizados en una trayectoria cerrada es cero.
- En un circuito cerrado, las caídas de voltaje siempre son de polaridad opuesta al voltaje total de la fuente.
- Se define que la corriente convencional sale del lado positivo de una fuente en dirección al lado negativo.
- Se define que la corriente convencional se dirige hacia el lado positivo de cada resistor y sale por el lado más negativo (menos positivo).
- Una disminución del nivel de energía a través de un resistor produce una caída de voltaje.
- Un divisor de voltaje es un arreglo en serie de resistores conectado a una fuente de voltaje.
- Un divisor de voltaje recibe ese nombre porque la caída de voltaje a través de cualquier resistor dispuesto en el circuito en serie se reduce, en relación con el voltaje total, en una cantidad que es proporcional a dicho valor de resistencia con respecto a la resistencia total.
- Se puede utilizar un potenciómetro como divisor ajustable de voltaje.
- La potencia total presente en un circuito resistivo es la suma de todas las potencias individuales de los resistores que forman el circuito en serie.
- La tierra (punto común) está a 0 volts con respecto a todos los puntos del circuito referidos con ella.
- *Tierra negativa* es el término utilizado cuando el lado negativo de la fuente está conectado a tierra.
- *Tierra positiva* es el término utilizado cuando el lado positivo de la fuente está conectado a tierra.
- El voltaje a través de un componente abierto siempre es igual al voltaje de fuente.
- El voltaje a través de un componente en cortocircuito siempre es de 0 V.

TÉRMINOS CLAVE

Estos términos clave también se encuentran en el glosario incluido al final del libro.

Circuito abierto Condición de estado de un circuito en la cual la trayectoria de la corriente está interrumpida.

Corto Condición de estado de un circuito en la cual existe una trayectoria de resistencia cero o anormalmente baja entre dos puntos; casi siempre es una condición accidental.

Divisor de voltaje Circuito que consta de resistores en serie donde a través de uno o más resistores se miden voltajes de salida.

Ley del voltaje de Kirchhoff Esta ley establece que (1) la suma de las caídas de voltaje alrededor de una sola trayectoria cerrada es igual al voltaje de fuente en dicha trayectoria, o (2) que la suma algebraica de todos los voltajes (caídas y de fuente) alrededor de una sola trayectoria cerrada es cero.

Serie En un circuito eléctrico, es una relación de componentes en la cual éstos están conectados de modo que proporcionen una trayectoria única para la corriente entre dos puntos.

Tierra de referencia Método de conexión a tierra mediante el cual el chasis metálico que aloja el ensamble o una gran área conductiva de una tarjeta de circuito impreso se utilizan como punto común o de referencia.

FÓRMULAS

5–1	$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$	Resistencia total de resistores en serie
5–2	$R_T = nR$	Resistencia total de *n* resistores de igual valor en serie
5–3	$V_S = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$	Ley del voltaje de Kirchhoff

5–4 $V_S - V_1 - V_2 - V_3 - \cdots - V_n = 0$ Ley del voltaje de Kirchhoff formulada de otra manera

5–5 $V_x = \left(\frac{R_x}{R_T}\right)V_S$ Fórmula del divisor de voltaje

5–6 $P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$ Potencia total

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Cinco resistores de igual valor se conectan en serie y hay una corriente de 2 mA hacia el primer resistor. La cantidad de corriente que sale del segundo resistor es
   (a) igual a 2 mA **(b)** menor que 2 mA **(c)** mayor que 2 mA
2. Para medir la corriente que sale del tercer resistor en un circuito compuesto por cuatro resistores en serie, se coloca un amperímetro
   (a) entre el tercero y cuarto resistores **(b)** entre el segundo y tercero resistores
   (c) en la terminal positiva de la fuente **(d)** en cualquier punto del circuito
3. Cuando se conecta un tercer resistor en serie con dos resistores en serie, la resistencia total
   (a) permanece igual **(b)** aumenta
   (c) disminuye **(d)** aumenta en un tercio
4. Cuando uno de cuatro resistores en serie se quita de un circuito y este último vuelve a conectarse a la corriente
   (a) disminuye en la cantidad de corriente que recorre al transistor removido
   (b) disminuye en un cuarto
   (c) se cuadruplica
   (d) aumenta
5. Un circuito en serie se compone de tres resistores con valores de 100 Ω, 220 Ω, y 330 Ω. La resistencia total es
   (a) menor que 100 Ω **(b)** el promedio de los valores **(c)** de 550 Ω **(d)** de 650 Ω
6. Se conecta una batería de 9 V a través de una combinación en serie de resistores de 68 Ω, 33 Ω, 100 Ω, y 47 Ω. La cantidad de corriente es de
   (a) 36.3 mA **(b)** 27.6 A **(c)** 22.3 mA **(d)** 363 mA
7. Al colocar cuatro baterías de 1.5 V en una linterna, accidentalmente se pone una batería al revés. El voltaje a través del foco será de
   (a) 6 V **(b)** 3 V **(c)** 4.5 V **(d)** 0 V
8. Si usted mide todas las caídas de voltaje y el voltaje de la fuente en un circuito en serie y los suma, considerando las polaridades, obtendrá un resultado igual a
   (a) el voltaje de la fuente **(b)** el total de las caídas de voltaje
   (c) cero **(d)** el total del voltaje de fuente y las caídas de voltaje
9. Hay seis resistores en un circuito en serie dado y cada resistor tiene una caída de 5 V a través de él. El voltaje de fuente es
   (a) 5 V **(b)** 30 V
   (c) depende de los valores de los resistores **(d)** depende de la corriente
10. Un circuito en serie se compone de un resistor de 4.7 kΩ, uno de 5.6 kΩ, y otro de 10 kΩ. El resistor con más voltaje es
    (a) el de 4.7 kΩ **(b)** el de 5.6 kΩ
    (c) el de 10 kΩ **(d)** imposible determinarlo con la información dada
11. ¿Cuál de las siguientes combinaciones en serie disipa más potencia cuando se conecta a través de una fuente de 100 V?
    (a) Un resistor de 100 Ω **(b)** Dos resistores de 100 Ω
    (c) Tres resistores de 100 Ω **(d)** Cuatro resistores de 100 Ω
12. La potencia total presente en un circuito dado es de 1 W. Cada uno de los cinco resistores dispuestos en serie y de igual valor que forman el circuito disipa
    (a) 1 W **(b)** 5 W **(c)** 0.5 W **(d)** 0.2 W

13. Cuando se conecta un amperímetro en un circuito resistivo en serie y se activa el voltaje de fuente, el medidor lee cero. Deberá buscarse
    (a) un alambre roto **(b)** un resistor en cortocircuito
    (c) un resistor abierto **(d)** las respuestas (a) y (c)
14. Al revisar un circuito resistivo en serie, usted se da cuenta de que la corriente está más alta de lo que debería. Deberá buscar
    (a) un circuito abierto **(b)** un corto **(c)** un valor de resistor bajo **(d)** las respuestas (b) y (c)

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 5-70.

1. Si la corriente mostrada por uno de los miliamperímetros se incrementa, la corriente mostrada por los otros dos
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
2. Si el voltaje de fuente disminuye, la corriente indicada por cada miliamperímetro
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
3. Si la corriente a través de R_1 se incrementa porque R_1 es reemplazado por un resistor diferente, la corriente indicada por cada miliamperímetro
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 5-73.

4. Con una fuente de voltaje de 10 V conectada entre los puntos *A* y *B* cuando los interruptores cambian de la posición 1 a la 2, la corriente total proveniente de la fuente
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
5. En las condiciones descritas en la pregunta 4, la corriente a través de R_3
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
6. Cuando los interruptores están en la posición 1 y se desarrolla un corto a través de R_3, la corriente en R_2
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
7. Cuando los interruptores están en la posición 2 y se desarrolla un corto a través de R_3, la corriente en R_5
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 5-77.

8. Si el interruptor se cambia de la posición *A* a la posición *B*, la lectura del amperímetro
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
9. Si el interruptor se cambia de la posición *B* a la *C*, el voltaje a través de R_4
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
10. Si el interruptor se cambia de la posición *C* a la *D*, la corriente a través de R_3
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 5-84(b).

11. Si R_1 cambia a 1.2 kΩ, el voltaje de *A* a *B*
    (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
12. Si R_2 y R_3 se intercambian, el voltaje de *A* a *B*
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
13. Si el voltaje de la fuente se incrementa de 8 a 10 V, el voltaje de *A* a *B*
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 5-91.

14. Si la fuente de 9 V se reduce a 5 V, la corriente en el circuito
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
15. Si la fuente de 9 V se invierte, el voltaje en el punto *B* con respecto a tierra
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

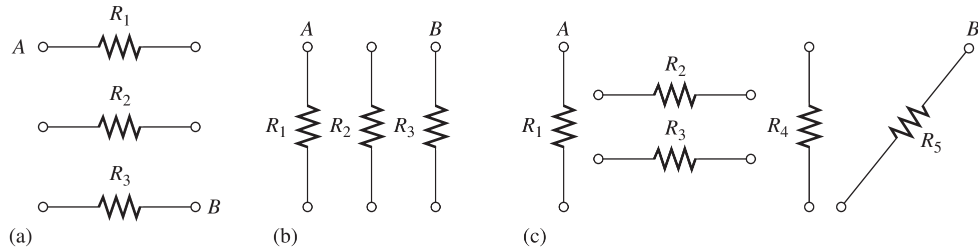
PROBLEMAS

Un asterisco (*) indica los problemas más difíciles.
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 5–1 Resistores en serie

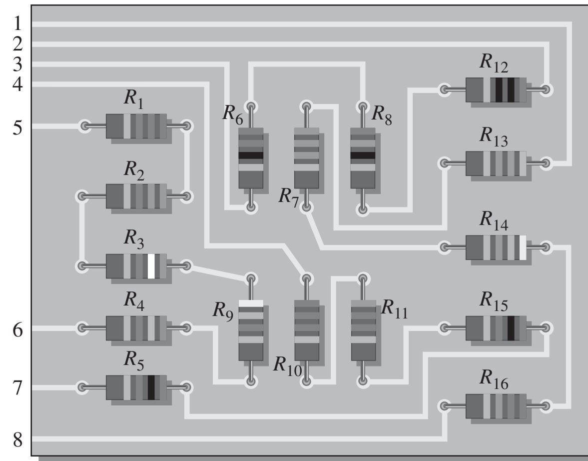
1. Conecte en serie cada juego de resistores mostrado en la figura 5-67 entre los puntos *A* y *B*.

▶ FIGURA 5–67



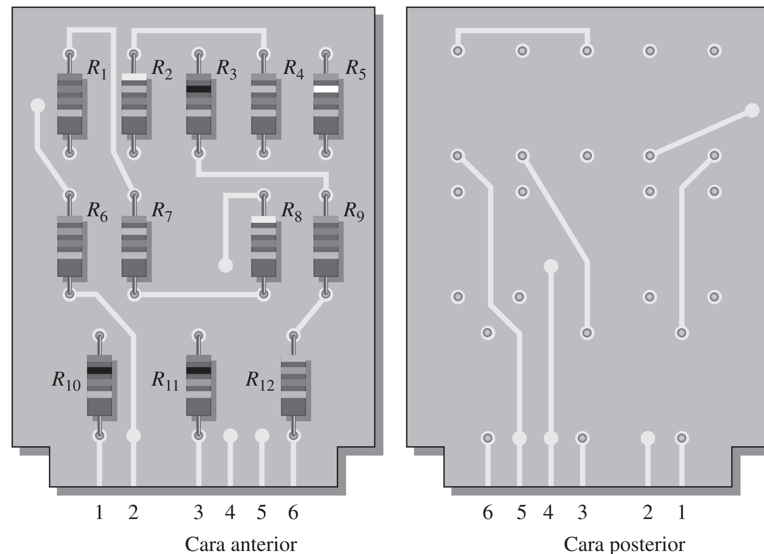
2. Determine qué resistores de la figura 5-68 están en serie. Demuestre cómo interconectar las puntas para poner todos los resistores en serie.

▶ FIGURA 5–68



3. Determine la resistencia nominal presente entre las puntas 1 y 8 del circuito de la figura 5-68.
4. Determine la resistencia nominal presente entre las puntas 2 y 3 del circuito de la figura 5-68.
5. En la tarjeta de circuito impreso de doble cara mostrada en la figura 5-69, identifique cada grupo de resistores en serie. Observe que muchas de las interconexiones de la tarjeta van de la cara anterior a la cara posterior.

▶ FIGURA 5–69

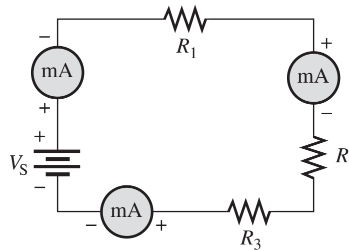


SECCIÓN 5–2 Corriente en un circuito en serie

6. ¿Cuál es la corriente a través de cada resistor dispuesto en un circuito en serie si el voltaje total es de 12 V y la resistencia total de 120 Ω?

7. La corriente suministrada por la fuente en la figura 5-70 es de 5 mA. ¿Cuánta corriente indica cada miliamperímetro localizado en el circuito?

▶ FIGURA 5–70



8. Muestre cómo conectar una fuente de voltaje y un amperímetro a la tarjeta de circuito impreso ilustrada en la figura 5-68 para medir la corriente en R_1. ¿Qué otras corrientes de resistor se miden con esta configuración?

***9.** Con baterías de 1.5 V, un interruptor, y tres lámparas, disponga un circuito para aplicar 4.5 V a través de cualquier lámpara, de dos lámparas en serie, o de tres lámparas en serie con un solo interruptor de control. Trace el diagrama esquemático.

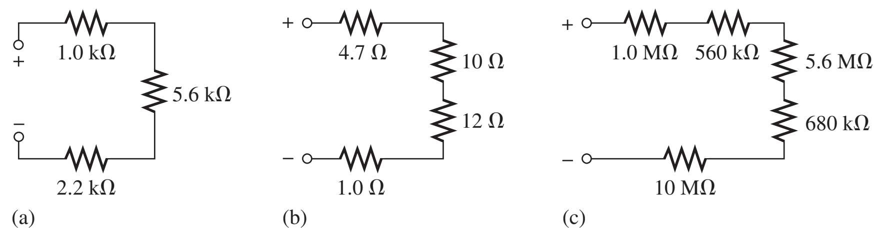
SECCIÓN 5–3 Resistencia total en serie

10. Se conectan los siguientes resistores (uno de cada uno) en un circuito en serie: 1.0 Ω, 2.2 Ω, 5.6 Ω, 12 Ω, y 22 Ω. Determine la resistencia total.

11. Encuentre la resistencia total de los siguientes grupos de resistores en serie:

(a) 560 Ω y 1000 Ω **(b)** 47 Ω y 56 Ω

(c) 1.5 kΩ, 2.2 kΩ, y 10 kΩ **(d)** 1.0 MΩ, 470 kΩ, 1.0 kΩ, 2.2 MΩ



▲ FIGURA 5–71

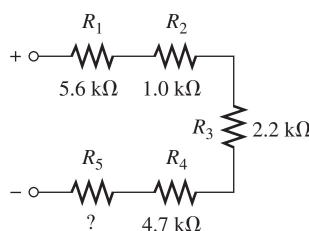
12. Calcule la R_T en cada circuito de la figura 5-71.

13. ¿Cuál es la resistencia total de doce resistores de 5.6 kΩ dispuestos en serie?

14. Se conectan en serie seis resistores de 56 Ω, ocho de 100 Ω, y dos de 22 Ω. ¿Cuál es la resistencia total?

15. Si en la figura 5-72 la resistencia total es de 17.4 kΩ, ¿cuál es el valor de R_5?

▶ FIGURA 5–72

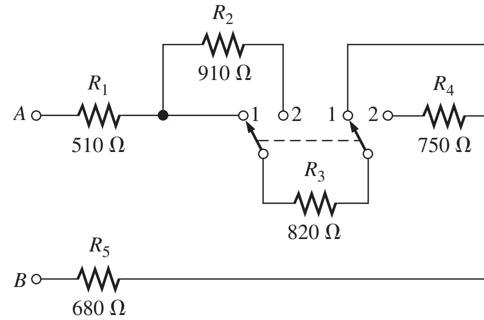


***16.** Usted dispone de los siguientes valores de resistor en el laboratorio en cantidades ilimitadas: 10 Ω, 100 Ω, 470 Ω, 560 Ω, 680 Ω, 1.0 kΩ, 2.2 kΩ, y 5.6 kΩ. No hay existencias de todos los demás valores estándar. Un proyecto en el que está trabajando requiere emplear una resistencia de 18 kΩ. ¿Qué combinación de los valores disponibles utilizaría en serie para lograr la resistencia total?

17. En la figura 5-71, encuentre la resistencia total si los tres circuitos están conectados en serie.

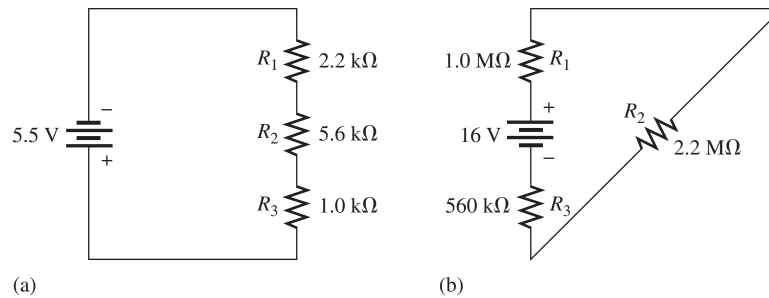
18. En la figura 5-73, ¿cuál es la resistencia total de *A* a *B* con cada posición del interruptor?

▶ FIGURA 5–73



SECCIÓN 5–4 Aplicación de la ley de Ohm

19. ¿Cuál es la corriente presente en cada circuito de la figura 5-74?



▲ FIGURA 5–74

20. Determine la caída de voltaje a través de cada resistor mostrado en la figura 5-74.

21. Se conectan tres resistores de 470 Ω en serie con una fuente de 48 V.

(a) ¿Cuál es la corriente en el circuito?

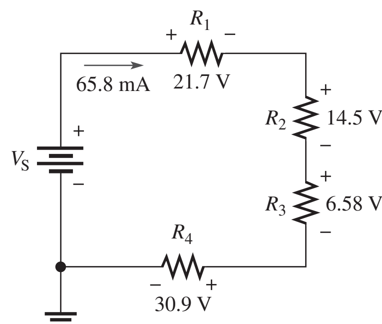
(b) ¿Cuál es el voltaje a través de cada resistor?

(c) ¿Cuál es el valor nominal de potencia de los resistores?

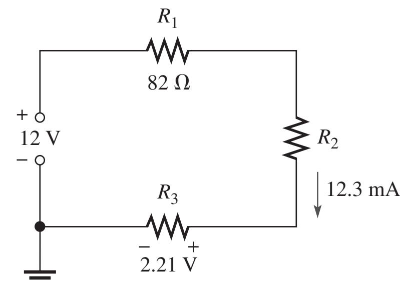
22. Cuatro resistores de igual valor están en serie con una batería de 5 V y se miden 2.23 mA. ¿Cuál es el valor de cada resistor?

23. ¿Cuál es el valor de cada resistor mostrado en la figura 5-75?

24. Determine V_{R1}, R_2 y R_3 en la figura 5-76.

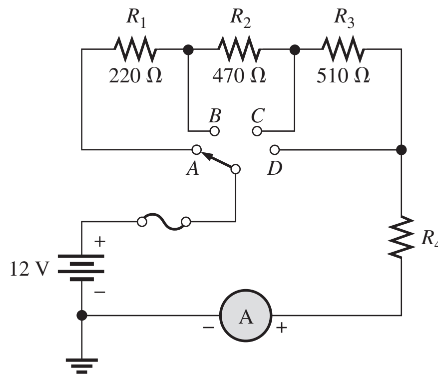


▲ FIGURA 5–75

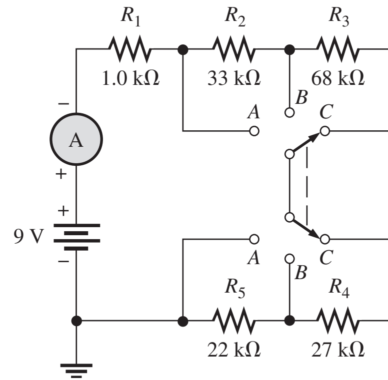


▲ FIGURA 5–76

25. En el circuito de la figura 5-77, el medidor lee 7.84 mA cuando el interruptor está en la posición *A*.
   (a) ¿Cuál es la resistencia de R_4?
   (b) ¿Cuál deberá ser la lectura del medidor en las posiciones *B*, *C* y *D* del interruptor?
   (c) ¿Se fundirá un fusible de ¼ A en cualquier posición del interruptor?
26. Determine la corriente que el medidor de la figura 5-78 lee en cada posición del interruptor calibrado.



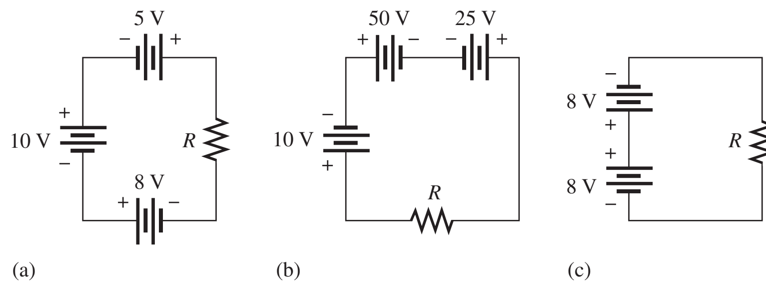
▲ FIGURA 5–77



▲ FIGURA 5–78

SECCIÓN 5–5 Fuentes de voltaje en serie

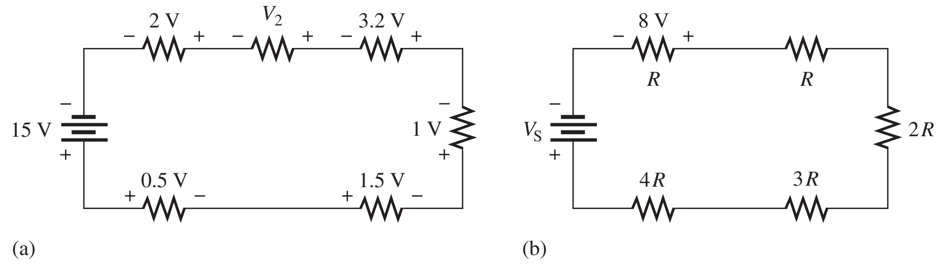
27. *Ayuda en serie* es un término utilizado en ocasiones para describir fuentes de voltaje de la misma polaridad en serie. Si una fuente de 5 V y otra de 9 V están conectadas de esta manera, ¿cuál es el voltaje total?
28. El término *oposición en serie* significa que las fuentes están en serie con polaridades opuestas. Si una batería de 12 V y otra de 3 V están en oposición en serie, ¿cuál es el voltaje total?
29. Determine el voltaje de fuente total en cada circuito de la figura 5-79.



▲ FIGURA 5–79

SECCIÓN 5–6 Ley del voltaje de Kirchhoff

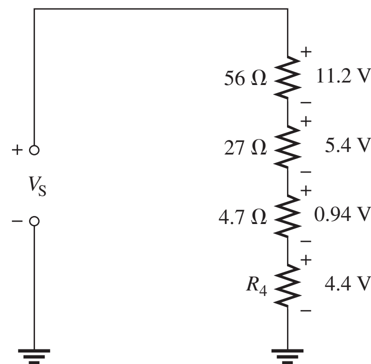
30. Se miden las siguientes caídas de voltaje a través de tres resistores dispuestos en serie: 5.5 V, 8.2 V, y 12.3 V. ¿Cuál es el valor del voltaje de la fuente al que están conectados estos resistores?
31. Cinco resistores están dispuestos en serie con una fuente de 20 V. Las caídas de voltaje a través de cuatro de los resistores son: 1.5 V, 5.5 V, 3 V, y 6 V. ¿Cuál es la caída de voltaje en el quinto resistor?
32. Determine la caída o las caídas de voltaje no especificadas en cada circuito de la figura 5-80. Muestre cómo conectar un voltímetro para medir cada una de las caídas de voltaje desconocidas.



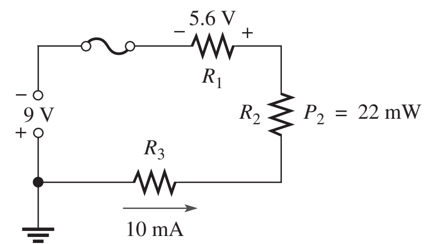
▲ FIGURA 5–80

33. En el circuito de la figura 5-81, determine la resistencia de R_4.

34. Encuentre R_1, R_2 y R_3 en la figura 5-82.



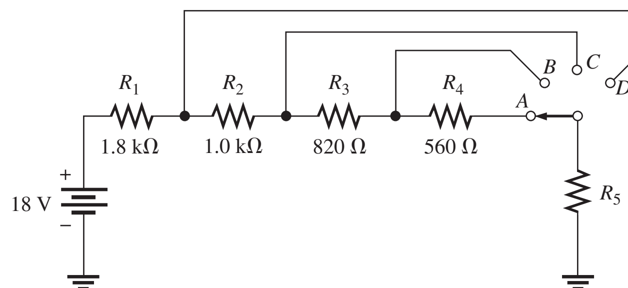
▲ FIGURA 5–81



▲ FIGURA 5–82

35. Determine el voltaje a través de R_5 para cada una de las posiciones del interruptor de la figura 5-83. La corriente en cada posición es como sigue: *A*, 3.35 mA; *B*, 3.73 mA; *C*, 4.50 mA; *D*, 6.00 mA.

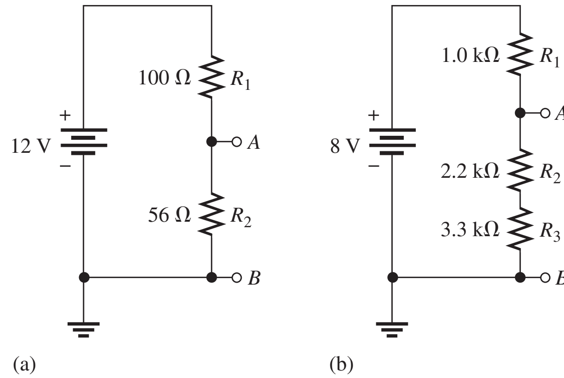
36. Con el resultado del problema 35, determine el voltaje a través de cada resistor mostrado en la figura 5-83 para cada posición del interruptor.



▲ FIGURA 5–83

SECCIÓN 5–7 Divisores de voltaje

***37.** La resistencia total de un circuito es de 560 Ω. ¿Qué porcentaje del voltaje total aparece a través de un resistor de 27 Ω que forma parte de la resistencia total en serie?



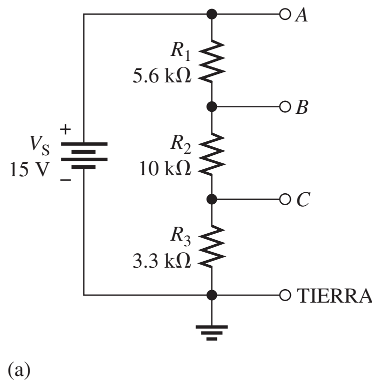
▲ FIGURA 5–84

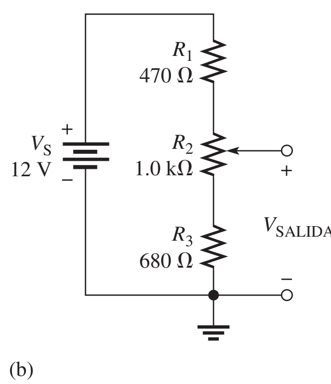
38. Determine el voltaje entre los puntos *A* y *B* en cada divisor de voltaje de la figura 5-84.

39. Determine el voltaje con respecto a tierra para las salidas *A*, *B* y *C* en la figura 5-85(a).

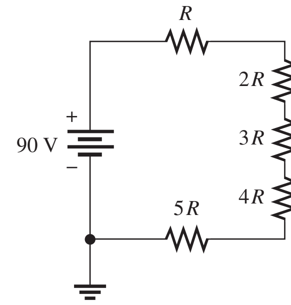
40. Determine los voltajes mínimo y máximo producidos por el divisor de voltaje de la figura 5-85(b).

*__41.__ ¿Cuál es el voltaje a través de cada resistor mostrado en la figura 5-86? *R* es el resistor de valor más bajo, y todos los demás resistores son múltiplos de dicho valor como se indica.





▲ FIGURA 5–85

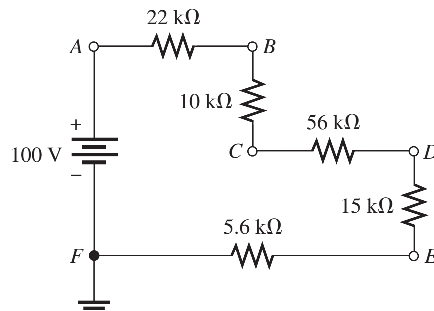


▲ FIGURA 5–86

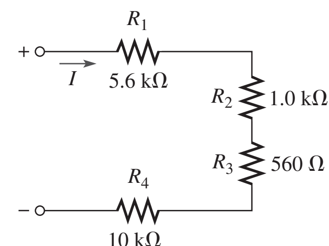
42. En cada punto de la figura 5-87, determine el voltaje con respecto al lado negativo de la batería.

43. Si hay 10 V a través de R_1 en la figura 5-88, ¿cuál es el voltaje en cada uno de los demás resistores?

*__44.__ Con la tabla de valores estándar de resistor dada en el apéndice A, diseñe un divisor de voltaje para producir los siguientes voltajes aproximados con respecto a tierra utilizando una fuente de 30 V; 8.18 V, 14.7 V,



▲ FIGURA 5–87



▲ FIGURA 5–88

y 24.6 V. La corriente extraída de la fuente debe limitarse a no más de 1 mA. El número de resistores, sus valores, y sus valores nominales de potencia en watts deben ser especificados. Se debe proporcionar un diagrama esquemático que muestre la disposición del circuito y la colocación de los resistores.

***45.** Diseñe un divisor de voltaje variable para producir un voltaje de salida ajustable desde un mínimo de 10 V hasta un máximo de 100 V dentro del $\pm 1\%$ con una fuente de 1 a 120 V. El voltaje máximo debe ocurrir en el ajuste de resistencia máxima del potenciómetro, y el voltaje mínimo debe ocurrir en el ajuste de resistencia mínima (cero). La corriente tiene que ser de 10 mA.

SECCIÓN 5–8 Potencia en circuitos en serie

46. Cada uno de cinco resistores dispuestos en serie manejan 50 mW. ¿Cuál es la potencia total?

47. ¿Cuál es la potencia total en el circuito de la figura 5-88? Use los resultados del problema 43.

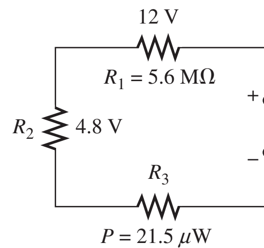
48. Los siguientes resistores de ¼ W están dispuestos en serie: 1.2 kΩ, 2.2 kΩ, 3.9 kΩ, y 5.6 kΩ. ¿Cuál es el voltaje máximo que puede ser aplicado a través de estos resistores sin exceder el valor nominal de potencia? ¿Cuál resistor se quemará primero al aplicar un voltaje excesivo?

49. Encuentre R_T en la figura 5-89.

50. Cierto circuito en serie se compone de un resistor de ⅛ W, un resistor de ¼ W, y un resistor de ½ W. La resistencia total es de 2400 Ω. Si cada uno de los resistores opera en el circuito a su máxima disipación de potencia, determine lo siguiente:

(a) I **(b)** V_T **(c)** El valor de cada resistor

▶ FIGURA 5–89

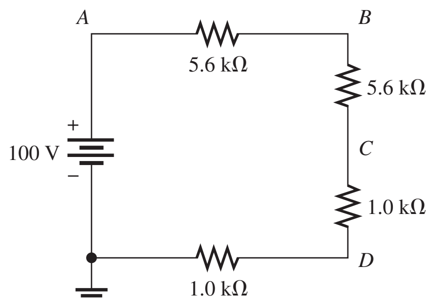


SECCIÓN 5–9 Mediciones de voltaje

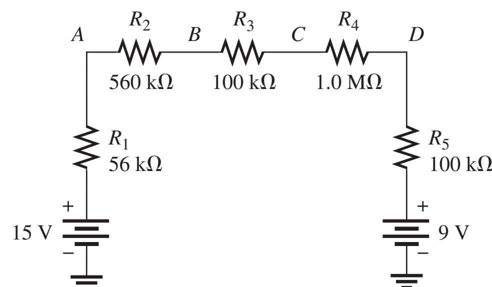
51. En la figura 5-90, determine el voltaje en cada punto con respecto a tierra.

52. En la figura 5-91, ¿cómo determinaría el voltaje en R_2 por medición, sin conectar un medidor directamente a través del resistor?

53. En la figura 5-91, determine el voltaje en cada punto con respecto a tierra.



▲ FIGURA 5–90

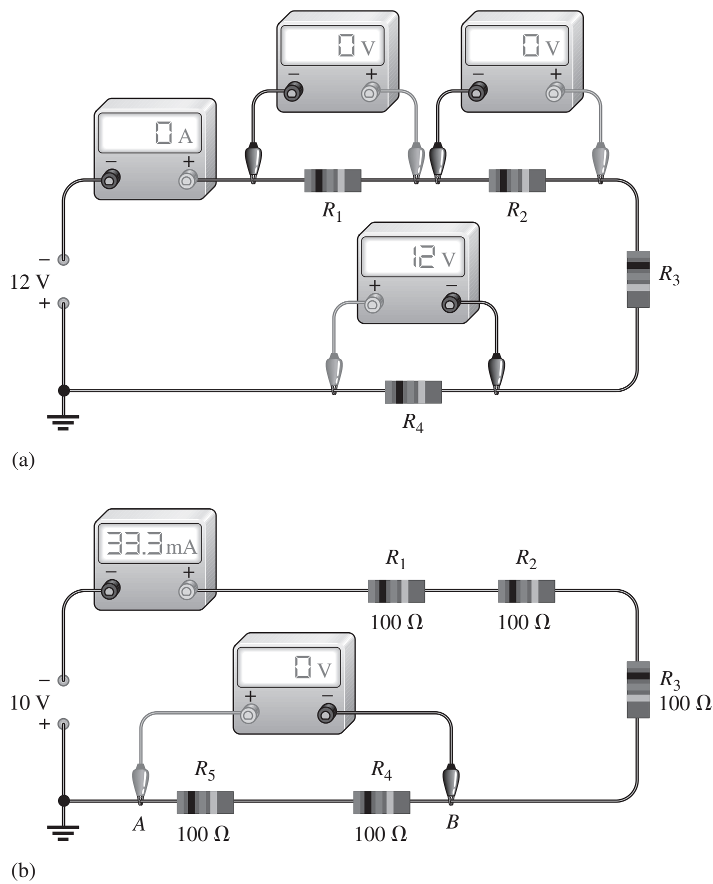


▲ FIGURA 5–91

SECCIÓN 5–10 Localización de fallas

54. Se conecta una serie de cinco resistores a través de una batería de 12 V. Se miden 0 volts en todos los resistores excepto en R_2. ¿Qué está mal en el circuito? ¿Qué voltaje se medirá a través de R_2?

▶ FIGURA 5–92



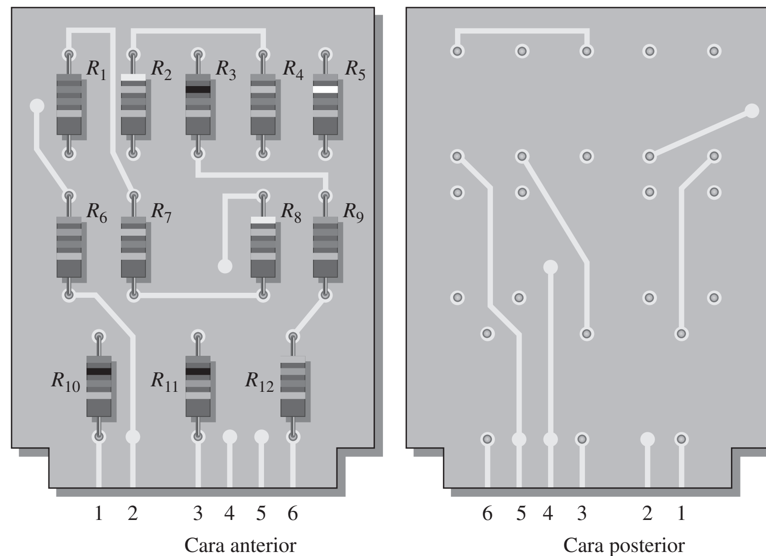
55. Observe los medidores de la figura 5-92 y determine los tipos de fallas ocurridos en los circuitos y qué componentes fallaron.

56. ¿Cuál corriente mediría usted en la figura 5-91(b) si sólo R_2 estuviera en cortocircuito?

*__57.__ La tabla 5-1 muestra los resultados de mediciones de resistencia efectuadas en la tarjeta de circuito impreso que aparece en la figura 5-93. ¿Son correctos estos resultados? Si no, identifique los posibles problemas.

▶ TABLA 5–1

ENTRE LAS PUNTAS	RESISTENCIA
1 y 2	∞
1 y 3	∞
1 y 4	4.23 kΩ
1 y 5	∞
1 y 6	∞
2 y 3	23.6 kΩ
2 y 4	∞
2 y 5	∞
2 y 6	∞
3 y 4	∞
3 y 5	∞
3 y 6	∞
4 y 5	∞
4 y 6	∞
5 y 6	19.9 kΩ



▲ **FIGURA 5–93**

*__58.__ Se leen 15 kΩ entre las puntas 5 y 6 de la tarjeta de circuito impreso mostrada en la figura 5-93. ¿Indica esto un problema? De ser así, identifíquelo.

*__59.__ Al examinar la tarjeta de circuito impreso de la figura 5-93, se miden 17.83 kΩ entre las puntas 1 y 2. Asimismo, 13.6 kΩ entre las puntas 2 y 4. ¿Indica esto un problema en la tarjeta de circuito impreso? De ser así, identifíquelo

*__60.__ Los tres grupos de resistores en serie mostrados en la tarjeta de circuito impreso de la figura 5-93 están conectados en serie entre sí para formar un solo circuito en serie conectando la punta 2 a la 4 y la 3 a la 5. Se conecta una fuente de voltaje entre las puntas 1 y 6 y se coloca un amperímetro en serie. Conforme aumenta el voltaje de la fuente, se observa el incremento correspondiente de la corriente. De improviso, la corriente se reduce a cero y huele a humo. Todos los resistores son de ½ W.

(a) ¿Qué sucedió?

(b) Específicamente, ¿qué debe hacerse para arreglar el problema?

(c) ¿Con qué voltaje ocurrió la falla?



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

61. Abra el archivo P05-61 y mida la resistencia total en serie.

62. Abra el archivo P05-62 y determine mediante lecturas si hay un resistor abierto y, de ser así, señale cuál es.

63. Abra el archivo P05-63 y determine el valor de resistencia no especificado.

64. Abra el archivo P05-64 y determine el voltaje de fuente no especificado.

65. Abra el archivo P05-65 y localice el resistor en cortocircuito, si lo hay.

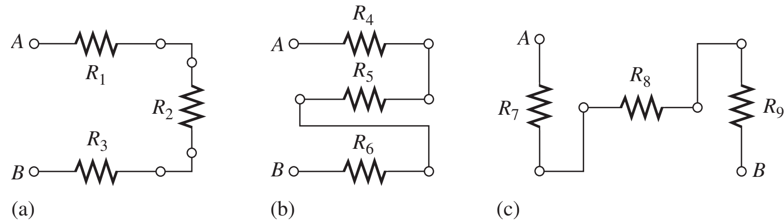
RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

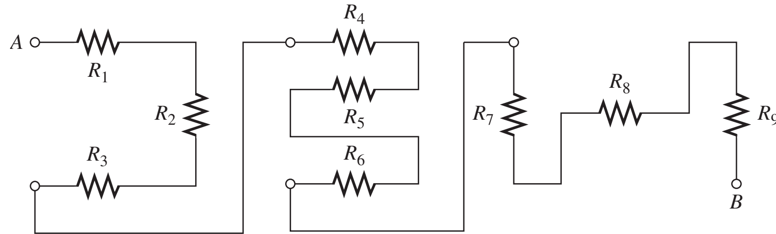
SECCIÓN 5–1 Resistores en serie

1. Los resistores en serie se conectan extremo con extremo en una "cadena" con cada terminal de un resistor dado conectado a un resistor diferente.

2. En un circuito en serie, existe una sola trayectoria para la corriente.



▲ FIGURA 5–94



▲ FIGURA 5–95

3. Vea la figura 5-94.
4. Vea la figura 5-95.

SECCIÓN 5–2 Corriente en un circuito en serie

1. $I = 1\text{ A}$
2. El miliamperímetro lee 50 mA entre *C* y *D*, y 50 mA entre *E* y *F*.
3. $I = 100\text{ V}/56\ \Omega = 1.79\text{ A}$; 1.79 A
4. En un circuito en serie, la corriente es la misma en todos los puntos

SECCIÓN 5–3 Resistencia total en serie

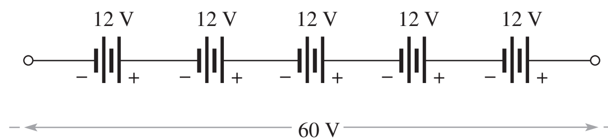
1. $R_T = 1.0\ \Omega + 2.2\ \Omega + 3.3\ \Omega + 4.7\ \Omega = 11.2\ \Omega$
2. $R_T = 100\ \Omega + 2(56\ \Omega) + 4(12\ \Omega) + 330\ \Omega = 590\ \Omega$
3. $R_5 = 13.8\text{ k}\Omega - (1.0\text{ k}\Omega + 2.7\text{ k}\Omega + 5.6\text{ k}\Omega + 560\ \Omega) = 3.94\text{ k}\Omega$
4. $R_T = 12(56\ \Omega) = 672\ \Omega$
5. $R_T = 20(5.6\text{ k}\Omega) + 30(8.2\text{ k}\Omega) = 358\text{ k}\Omega$

SECCIÓN 5–4 Aplicación de la ley de Ohm

1. $I = 10\text{ V}/300\ \Omega = 33.3\text{ mA}$
2. $V_S = (50\text{ mA})(21.2\ \Omega) = 1.06\text{ V}$
3. $V_1 = (50\text{ mA})(10\ \Omega) = 0.5\text{ V}$; $V_2 = (50\text{ mA})(5.6\ \Omega) = 0.28\text{ V}$; $V_3 = (50\text{ mA})(5.6\ \Omega) = 0.28\text{ V}$
4. $R = \frac{1}{4}(5\text{ V}/4.63\text{ mA}) = 270\ \Omega$

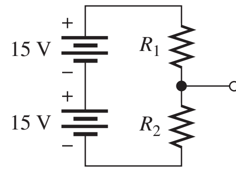
SECCIÓN 5–5 Fuentes de voltaje en serie

1. $V_T = 4(1.5\text{ V}) = 6.0\text{ V}$
2. $60\text{ V}/12\text{ V} = 5$; vea la figura 5-96.

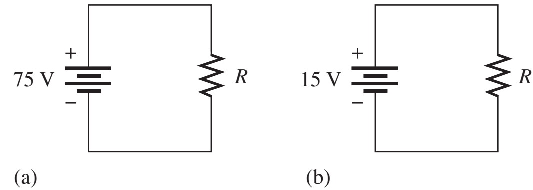


▲ FIGURA 5–96

3. Vea la figura 5-97.
4. **(a)** $V_{S(tot)} = 100\text{ V} + 50\text{ V} - 75\text{ V} = 75\text{ V}$
   (b) $V_{S(tot)} = 20\text{ V} + 10\text{ V} - 10\text{ V} - 5\text{ V} = 15\text{ V}$
5. Vea la figura 5-98.



▲ FIGURA 5–97



▲ FIGURA 5–98

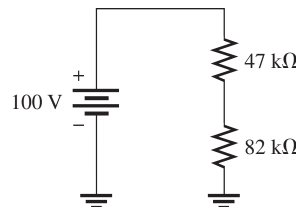
SECCIÓN 5–6 Ley del voltaje de Kirchhoff

1. **(a)** La ley de Kirchhoff establece que la suma algebraica de los voltajes alrededor de una trayectoria cerrada es cero.
   (b) La ley de Kirchhoff establece que la suma de las caídas de voltaje es igual al voltaje de fuente total.
2. $V_T = V_S = 50\text{ V}$
3. $V_1 = V_2 = 5\text{ V}$
4. $V_3 = 25\text{ V} - 10\text{ V} - 5\text{ V} = 10\text{ V}$
5. $V_S = 1\text{ V} + 3\text{ V} + 5\text{ V} + 8\text{ V} + 7\text{ V} = 24\text{ V}$

SECCIÓN 5–7 Divisores de voltaje

1. Un divisor de voltaje es un circuito con dos o más resistores en serie en el cual el voltaje tomado a través de cualquier resistor o combinación de resistores es proporcional al valor de la resistencia.
2. Dos o más resistores de un divisor de voltaje.
3. $V_x = (R_x/R_T)V_S$
4. $V_R = 10\text{ V}/2 = 5\text{ V}$
5. $V_{47} = (47\text{ k}\Omega/129\text{ k}\Omega)100\text{ V} = 36.4\text{ V}$; $V_{82} = (82\text{ k}\Omega/129\text{ k}\Omega)100\text{ V} = 63.6\text{ V}$; vea la figura 5-99.
6. Coloque el contacto deslizable en el punto medio.

▶ FIGURA 5–99



SECCIÓN 5–8 Potencia en circuitos en serie

1. Sume la potencia presente en cada resistor para obtener la potencia total.
2. $P_T = 2\text{ W} + 5\text{ W} + 1\text{ W} + 8\text{ W} = 16\text{ W}$
3. $P_T = (1\text{ A})^2(1110\ \Omega) = 1110\text{ W}$

SECCIÓN 5–9 Mediciones de voltaje

1. El punto de referencia en un circuito se llama tierra o común.
2. Verdadero
3. Verdadero

SECCIÓN 5–10 Localización de fallas

1. Un corto es una trayectoria de resistencia cero que evita una parte de un circuito.
2. Una abertura es una ruptura en la trayectoria de la corriente.
3. Cuando se abre un circuito, la corriente cesa.
4. Una abertura puede ser creada por un interruptor o por la falla de un componente. Un corto puede ser creado por un interruptor o, accidentalmente, por la unión de dos alambres o por una rebaba de soldadura.
5. Verdadero, un resistor normalmente falla al abrirse.
6. 24 V a través del resistor abierto; 0 V a través de los otros resistores

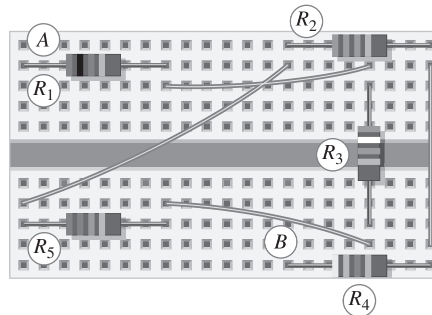
Una aplicación de circuito

1. $P_T = (12\text{ V})^2/16.6\text{ k}\Omega = 8.67\text{ mW}$
2. Punta 2: 1.41 V; Punta 6: 3.65 V; Punta 5: 4.01 V; Punta 4: 5.20 V; Punta 7: 3.11 V
3. La punta 3 se conecta a tierra.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

5–1 **(a)** Vea la figura 5-100.
(b) $R_1 = 1.0\text{ k}\Omega$, $R_2 = 33\text{ k}\Omega$, $R_3 = 39\text{ k}\Omega$, $R_4 = 470\ \Omega$, $R_5 = 22\text{ k}\Omega$

▶ FIGURA 5–100



5–2 Todos los resistores de la tarjeta están en serie.
5–3 258 Ω
5–4 12.1 kΩ
5–5 6.8 kΩ
5–6 4440 Ω
5–7 114 mA
5–8 7.8 V
5–9 $V_1 = 1$ V, $V_2 = 3.3$ V, $V_3 = 2.2$ V; $V_S = 6.5$ V; $V_{S(máx)} = 32.5$ V
5–10 Use un ohmmetro.
5–11 12 V
5–12 2 V
5–13 10 V y 20 V; $V_{fusible} = V_S = 30$ V; $V_{R1} = V_{R2} = 0$ V
5–14 47 V
5–15 593 Ω. Es muy probable que sea un resistor de 560 Ω porque 593 Ω está dentro de una tolerancia estándar (+10%) de 560 Ω.
5–16 $V_1 = 3.57$ V; $V_2 = 6.43$ V
5–17 $V_1 = V_2 = V_3 = 3.33$ V
5–18 $V_{AB} = 4$ V; $V_{AC} = 36.8$ V; $V_{BC} = 32.8$ V; $V_{BD} = 46$ V; $V_{CD} = 13.2$ V
5–19 8.49 W

5–20 $P_1 = 0.92$ W (1 W); $P_2 = 2.49$ W (5 W); $P_3 = 0.838$ W (1 W); $P_4 = 3.04$ W (5 W)

5–21 $V_A = 0$ V; $V_B = -25$ V; $V_C = -50$ V; $V_D = -75$ V; $V_E = -100$ V

5–22 3.33 V

AUTOEVALUACIÓN

1. (a) **2.** (d) **3.** (b) **4.** (d) **5.** (d) **6.** (a) **7.** b) **8.** (c)
9. (b) **10.** (c) **11.** (a) **12.** (d) **13.** (d) **14.** (d)

EXAMEN RÁPIDO

1. (a) **2.** (b) **3.** (a) **4.** (b) **5.** (b) **6.** (c)
7. (a) **8.** (a) **9.** (a) **10.** (b) **11.** (b) **12.** (c)
13. (a) **14.** (a) **15.** (b)

6 CIRCUITOS EN PARALELO

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Identificar un circuito resistivo en paralelo
- Determinar el voltaje a través de cada rama en paralelo
- Aplicar la ley de la corriente de Kirchhoff
- Determinar la resistencia total en paralelo
- Aplicar la ley de Ohm en un circuito en paralelo
- Determinar el efecto total de una fuente de corriente en paralelo
- Utilizar un circuito en paralelo como divisor de corriente
- Determinar la potencia en un circuito en paralelo
- Describir algunas aplicaciones básicas de circuitos en paralelo
- Localizar fallas en circuitos en paralelo

TÉRMINOS CLAVE

- Divisor de corriente
- Ley de las corrientes de Kirchhoff
- Nodo
- Paralelo
- Rama

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En esta aplicación, una fuente de potencia montada en un tablero será modificada mediante la adición de un miliamperímetro para indicar la corriente suministrada a una carga. Se mostrará la ampliación que puede hacerse del medidor, para aplicarlo a múltiples intervalos de corriente, por medio de resistores en paralelo (en derivación). Se introducirá el problema que se presenta con resistores de muy bajo valor cuando se utiliza un interruptor para seleccionar intervalos de corriente, y se demostrará el efecto de resistencia por contacto en interruptores. Se presentará una forma de eliminar la resistencia por contacto. Por último, se instalará el circuito de amperímetro en la fuente de potencia. Se pondrá en práctica el conocimiento adquirido acerca de los circuitos en paralelo y amperímetros básicos en este capítulo, y del conocimiento previo de la ley de Ohm, de los divisores de corriente, y del código de colores para resistores.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 5, usted aprendió acerca de circuitos en serie y cómo aplicar la ley de Ohm y la ley del voltaje de Kirchhoff. También vio la forma en que se puede utilizar un circuito en serie como divisor de voltaje para obtener varios voltajes especificados con una sola fuente de voltaje. Asimismo, se examinaron los efectos de las aberturas y de los cortos en circuitos en serie.

En este capítulo, verá cómo se utiliza la ley de Ohm en circuitos en paralelo; y aprenderá la ley de la corriente de Kirchhoff. También se presentan varias aplicaciones, tales como el sistema de iluminación automotriz, la instalación eléctrica residencial, y el alambrado eléctrico de amperímetros analógicos. Aprenderá a determinar la resistencia total en paralelo y a localizar resistores abiertos.

Cuando se conectan resistores en paralelo y se aplica voltaje a través del circuito en paralelo, cada resistor constituye una trayectoria distinta para la corriente. La resistencia total de un circuito en paralelo se reduce conforme más resistores se conectan en paralelo. El voltaje en cada uno de los resistores en paralelo es igual al voltaje aplicado a todo el circuito en paralelo.

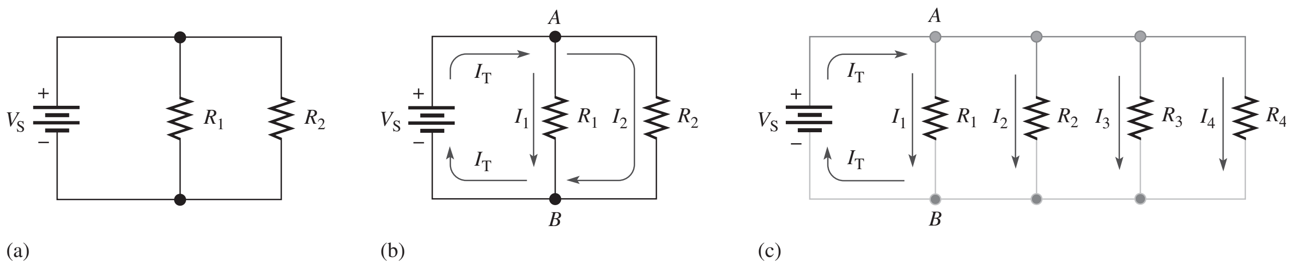
6–1 RESISTORES EN PARALELO

Cuando dos o más resistores se conectan individualmente entre dos puntos distintos, están en paralelo entre sí. Un circuito en paralelo proporciona más de una trayectoria para la corriente.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Identificar un circuito resistivo en paralelo**
  - Transformar una disposición física de resistores en paralelo en un diagrama esquemático

Cada trayectoria para la corriente se denomina **rama**, y un circuito en **paralelo** es uno que tiene más de una rama. En la figura 6-1(a) se muestran dos resistores conectados en paralelo. Tal como indica la parte (b), la corriente que sale de la fuente (I_T) se divide cuando llega al punto *A*. I_1 pasa por R_1 e I_2 por R_2. Si se conectan más resistores en paralelo con los dos primeros, se crean más trayectorias para la corriente entre el punto *A* y el punto *B*, como aparece en la figura 6-1(c). Todos los puntos ubicados a lo largo de la parte superior en gris son, eléctricamente, el mismo punto que el punto *A*, y todos los puntos localizados a lo largo de la parte inferior son, eléctricamente, el mismo punto que el punto *B*.



▲ FIGURA 6–1

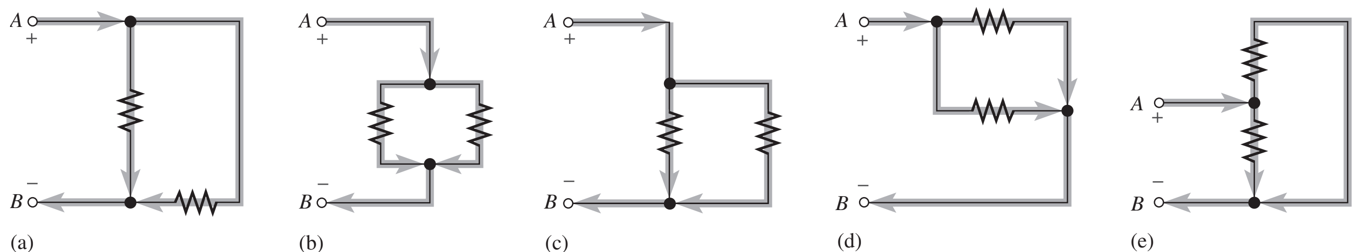
Resistores en paralelo.

En la figura 6-1, es obvio que los resistores están conectados en paralelo. A menudo, en diagramas de circuito reales, la relación en paralelo no queda clara. Es importante aprender a reconocer circuitos en paralelo sin importar cómo estén trazados.

Una regla para identificar circuitos en paralelo es la siguiente:

Si existe más de una trayectoria (rama) para la corriente entre dos puntos distintos, y si el voltaje entre dichos puntos también aparece a través de cada una de las ramas, entonces existe un circuito en paralelo entre esos dos puntos.

La figura 6-2 muestra resistores en paralelo trazados de diferentes formas entre dos puntos distintos designados con *A* y *B*. Observe que en cada caso la corriente tiene dos trayectorias que

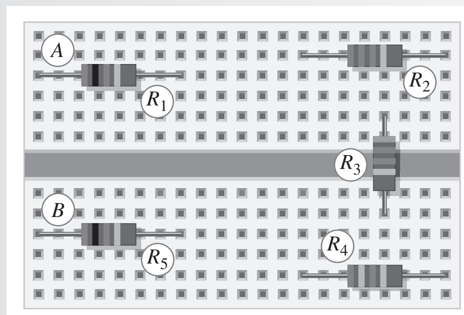


▲ FIGURA 6–2

Ejemplos de circuitos con dos trayectorias en paralelo.

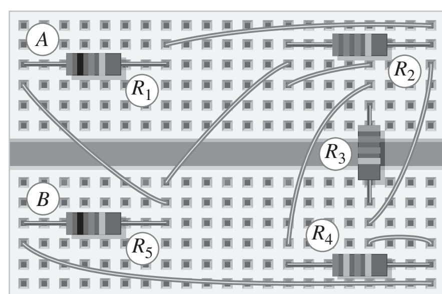
van de A a B, y el voltaje a través de cada rama es el mismo. Aunque estos ejemplos muestran sólo dos trayectorias en paralelo, puede haber cualquier cantidad de resistores en paralelo.

EJEMPLO 6–1 Se colocan cinco resistores en un protoboard (una tarjeta prototipo) como indica la figura 6-3. Muestre el alambrado eléctrico requerido para conectar todos los resistores en paralelo entre A y B. Trace un diagrama esquemático y marque cada uno de los resistores con su valor.

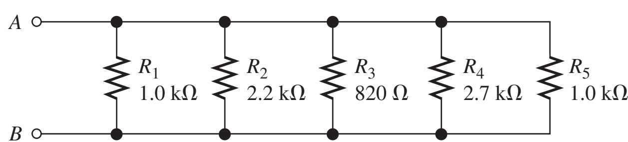


▲ **FIGURA 6–3**

Solución Los alambres se conectan como indica el diagrama de ensamble de la figura 6-4(a). El diagrama esquemático aparece en la figura 6-4(b). De nuevo, observe que el diagrama esquemático no necesariamente tiene que mostrar la disposición física real de los resistores. El diagrama esquemático muestra cómo están conectados eléctricamente los componentes.



(a) Diagrama de un ensamble de alambrado eléctrico



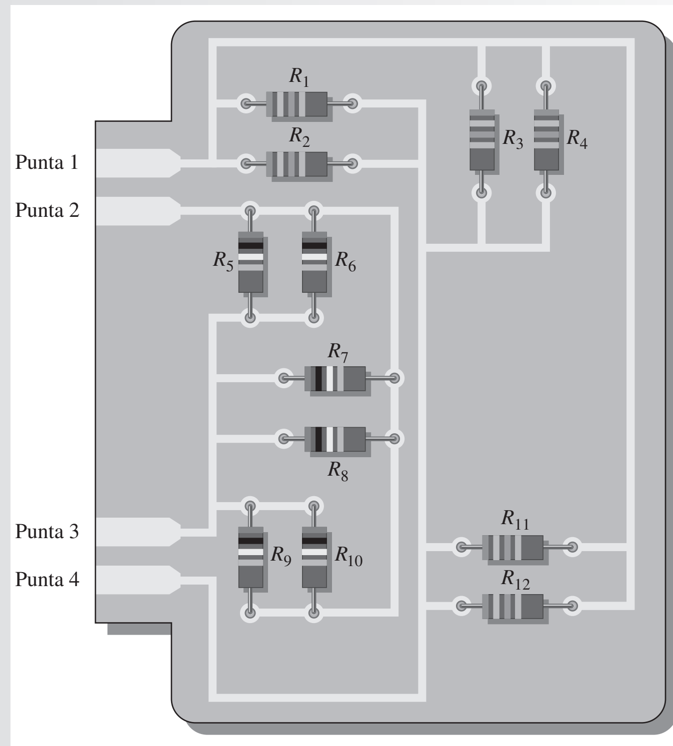
(b) Diagrama esquemático

▲ **FIGURA 6–4**

Problema relacionado* ¿Cómo tendría que ser realambrado el circuito si se quitara R_2?

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 6–2 Determine los agrupamientos en paralelo incluidos en la figura 6-5 y el valor de cada resistor.



▲ **FIGURA 6–5**

Solución Los resistores R_1 a R_4 y R_{11} y R_{12} están en paralelo. Esta combinación en paralelo se conecta a las puntas (o pines) 1 y 4. En este grupo cada resistor es de 56 kΩ.

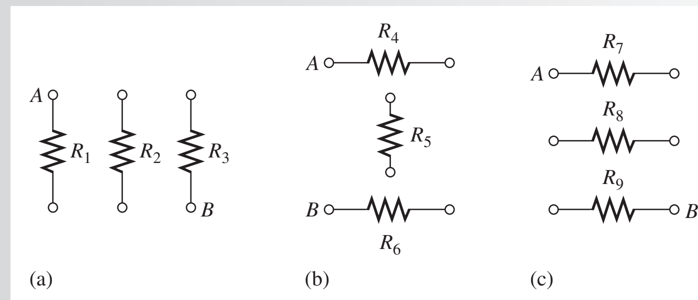
Los resistores R_5 a R_{10} están en paralelo. Esta combinación se conecta a las puntas 2 y 3. En este grupo cada resistor es de 100 kΩ.

Problema relacionado ¿Cómo conectaría en paralelo todos los resistores de la figura 6-5?

REPASO DE LA SECCIÓN 6-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. **¿Cómo están conectados los resistores en un circuito en paralelo?**
2. **¿Cómo se identifica un circuito en paralelo?**
3. **Complete el diagrama esquemático de los circuitos mostrados en cada parte de la figura 6-6 conectando los resistores en paralelo entre los puntos A y B.**

4. Conecte entre sí cada grupo de los resistores en paralelo mostrados en la figura 6-6.



▲ FIGURA 6–6

6–2 VOLTAJE EN UN CIRCUITO EN PARALELO

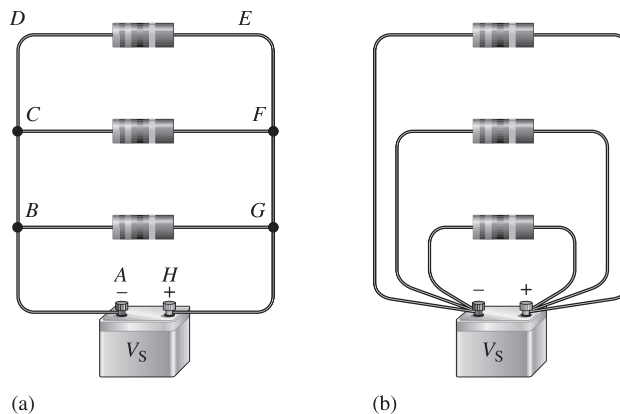
El voltaje a través de cualquier rama de un circuito dispuesto en paralelo es igual al voltaje a través de cada una de las demás ramas en paralelo. Como ya se sabe, en un circuito en paralelo, cada trayectoria para la corriente se denomina rama.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar el voltaje a través de cada rama en paralelo**
  - Explicar por qué el voltaje es el mismo a través de todos los resistores dispuestos en paralelo

Para ilustrar el voltaje presente en un circuito en paralelo, examinemos la figura 6-7(a). Los puntos *A*, *B*, *C* y *D* ubicados a lo largo del lado izquierdo del circuito en paralelo son eléctricamente el mismo punto porque el voltaje es el mismo a lo largo de esta línea. Se puede pensar en estos puntos como que están conectados por un solo conductor a la terminal negativa de la batería. Los puntos *E*, *F*, *G* y *H* situados a lo largo del lado derecho del circuito están a un voltaje igual al de la terminal positiva de la fuente. Por tanto, el voltaje a través de cada resistor en paralelo es el mismo, y cada voltaje es igual al voltaje de fuente. Observe que el circuito en paralelo ilustrado en la figura 6-7 se parece a una escalera.

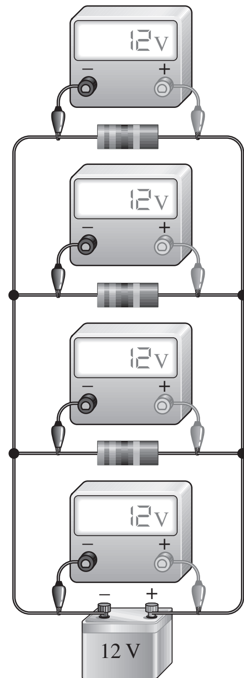
La figura 6-7(b) es el mismo circuito de la parte (a), pero dibujado en forma levemente distinta. En este caso, el lado izquierdo de cada resistor está conectado a un solo punto, el cual es la terminal negativa de la batería. El lado derecho de cada resistor está conectado a un solo punto, que es la terminal positiva de la batería. Los resistores siguen estando en paralelo a través de la fuente.



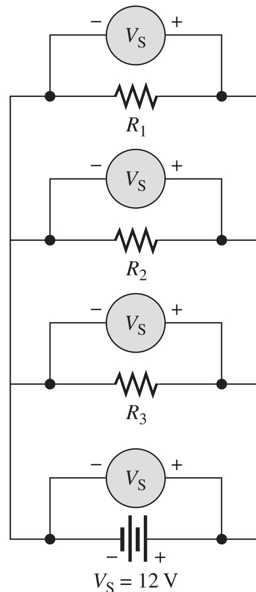
▶ FIGURA 6–7

El voltaje presente entre ramas dispuestas en paralelo es el mismo.

En la figura 6-8, una batería de 12 V está conectada por medio de tres resistores en paralelo. Cuando se mide el voltaje a través de la batería y luego a través de cada uno de los resistores, las lecturas son las mismas. Como se puede advertir, en un circuito en paralelo aparece el mismo voltaje a través de cada rama.



(a) Imagen pictórica



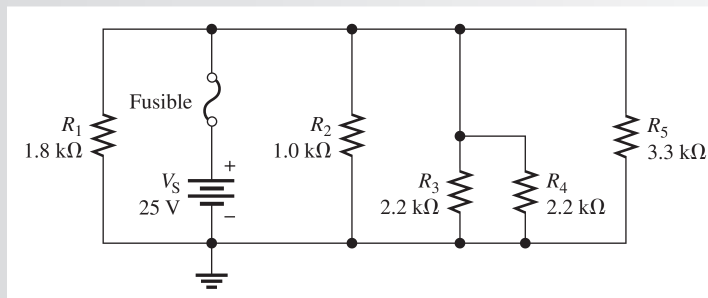
(b) Diagrama esquemático

◀ **FIGURA 6–8**

Aparece el mismo voltaje entre cada resistor en paralelo.

EJEMPLO 6–3 En la figura 6-9, determine el voltaje a través de cada resistor.

▶ **FIGURA 6–9**



Solución Los cinco resistores están en paralelo, de modo que el voltaje a través de cada uno es igual al voltaje de fuente aplicado. No existe voltaje en el fusible. El voltaje a través de los resistores es

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_S = \mathbf{25\ V}$$

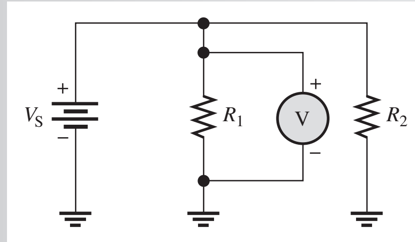
Problema relacionado Si se quita R_4 del circuito, ¿cuál es el voltaje a través de R_3?



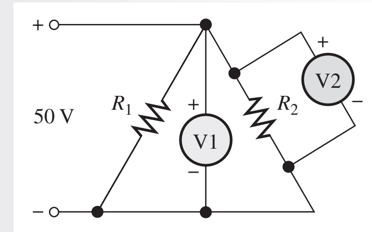
Use el archivo Multisim E06-03 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 6-2

1. Un resistor de 10 Ω y otro de 22 Ω están conectados en paralelo a una fuente de 5 V. ¿Cuál es el voltaje a través de cada uno de los resistores?
2. En la figura 6-10 está conectado un voltímetro a través de R_1. El voltímetro lee 118 V. Si usted lo cambia de lugar y lo conecta a través de R_2, ¿cuánto voltaje indicará? ¿Cuál es el voltaje de fuente?
3. En la figura 6-11, ¿cuánto voltaje indica el voltímetro 1? ¿El voltímetro 2?
4. ¿Cómo están relacionados los voltajes a través de cada rama de un circuito en paralelo?



▲ FIGURA 6–10



▲ FIGURA 6–11

6–3 LEY DE LAS CORRIENTES DE KIRCHHOFF

La ley del voltaje de Kirchhoff se ocupa de los voltajes presentes en una sola trayectoria cerrada. La ley de la corriente de Kirchhoff es aplicable a corrientes que circulan por múltiples trayectorias.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar la ley de las corrientes de Kirchhoff**
  - Enunciar la ley de las corrientes de Kirchhoff
  - Definir el término *nodo*
  - Determinar la corriente total sumando las corrientes de cada rama
  - Determinar una corriente desconocida que circula por una rama

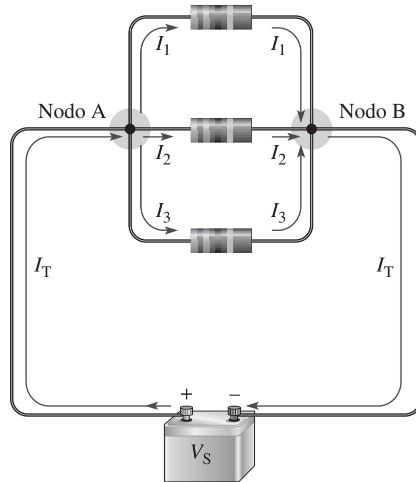
La **ley de las corrientes de Kirchhoff**, abreviada a menudo como KCL, por sus siglas en inglés, puede ser enunciada como sigue:

La suma de las corrientes que entran a un nodo (corriente total de entrada) es igual a la suma de las corrientes que salen de dicho nodo (corriente total de salida).

Un **nodo** es cualquier punto o unión en un circuito donde dos o más componentes están conectados. En un circuito en paralelo, un nodo o unión es un punto donde se juntan las ramas dispuestas en paralelo. Por ejemplo, en el circuito de la figura 6-12, el punto *A* es un nodo y el punto *B* otro nodo. Inicie en la terminal positiva de la fuente y siga la corriente. La corriente total I_T que viene de la fuente *entra* al nodo *A*. En este punto, la corriente se divide entre las tres ramas como se indica. Cada una de las tres corrientes de rama (I_1, I_2 e I_3) *sale* del nodo *A*. La ley de las corrientes de Kirchhoff establece que la corriente total que entra al nodo *A* es igual a la corriente total que sale del nodo *A*; es decir,

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

Ahora, cuando se siguen las corrientes mostradas en la figura 6-12 a través de las tres ramas, se advierte que regresan al nodo *B*. Las corrientes I_1, I_2 e I_3 se encuentran en el nodo *B* e I_T sale



◀ **FIGURA 6–12**

Ley de la corriente de Kirchhoff: la corriente que entra a un nodo es igual a la corriente que sale de dicho nodo.

de éste. La fórmula de la ley de la corriente de Kirchhoff en el nodo *B* es, por consiguiente, la misma que en el nodo *A*.

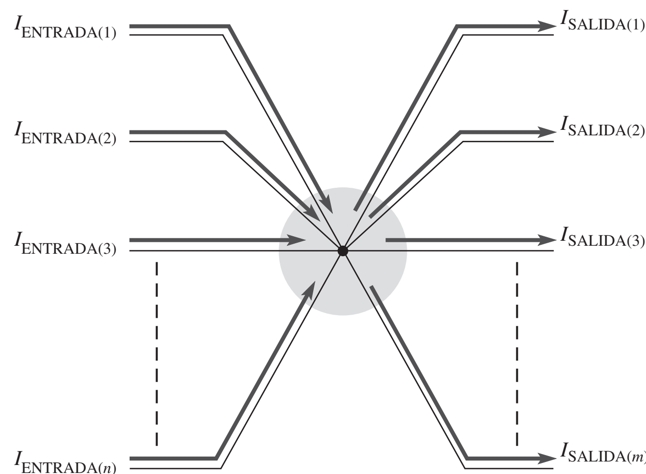
$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

La figura 6-13 muestra un nodo de circuito generalizado donde varias ramas están conectadas a un punto ubicado en un circuito. Las corrientes $I_{ENTRADA(1)}$ hasta $I_{ENTRADA(n)}$ entran al nodo *n* (*n* puede ser cualquier número). Las corrientes $I_{SALIDA(1)}$ hasta $I_{SALIDA(m)}$ salen del nodo (*m* puede ser cualquier número, pero no necesariamente igual a *n*). Con arreglo a la ley de la corriente de Kirchhoff, la suma de las corrientes que entran a un nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen del nodo. Con referencia a la figura 6-13, una fórmula general de la ley de la corriente de Kirchhoff es

$$I_{ENTRADA(1)} + I_{ENTRADA(2)} + \cdots + I_{ENTRADA(n)} = I_{SALIDA(1)} + I_{SALIDA(2)} + \cdots + I_{SALIDA(m)}$$ **Ecuación 6–1**

Si todos los términos del lado derecho de la ecuación 6-1 se pasan al lado izquierdo, sus signos cambian a negativos y en el lado derecho queda un cero como sigue:

$$I_{ENTRADA(1)} + I_{ENTRADA(2)} + \cdots + I_{ENTRADA(n)} - I_{SALIDA(1)} - I_{SALIDA(2)} - \cdots - I_{SALIDA(m)} = 0$$



$I_{ENTRADA(1)} + I_{ENTRADA(2)} + I_{ENTRADA(3)} + \ldots + I_{ENTRADA(n)} = I_{SALIDA(1)} + I_{SALIDA(2)} + I_{SALIDA(3)} + \ldots I_{SALIDA(m)}$

◀ **FIGURA 6–13**

Nodo de circuito generalizado que ilustra la ley de la corriente de Kirchhoff.

Con base en la última ecuación, la ley de la corriente de Kirchhoff también puede ser enunciada de esta manera:

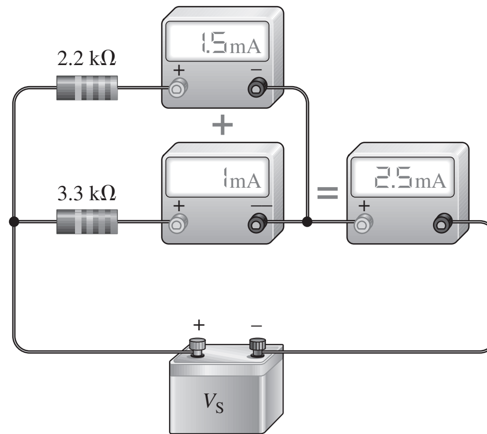
La suma algebraica de todas las corrientes que entran a y salen de un nodo es igual a cero.

Se puede verificar la ley de la corriente de Kirchhoff conectando un circuito y midiendo cada corriente de rama y la corriente total suministrada por la fuente, como ilustra la figura 6-14. Cuando se suman las corrientes de rama, su suma es igual a la corriente total. Esta regla es aplicable a cualquier cantidad de ramas.

Los tres ejemplos siguientes ilustran el uso de la ley de la corriente de Kirchhoff.

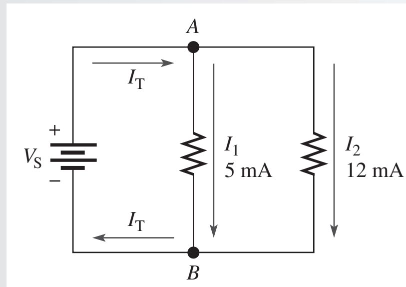
▶ **FIGURA 6–14**

Ilustración de la ley de las corrientes de Kirchhoff.



EJEMPLO 6–4 Las corrientes de rama se muestran en el circuito de la figura 6-15. Determine la corriente total que entra al nodo *A* y la corriente total que sale del nodo *B*.

▶ **FIGURA 6–15**



Solución La corriente total que sale del nodo *A* es la suma de las dos corrientes de rama. Así, la corriente total que entra al nodo *B* es

$$I_T = I_1 + I_2 = 5\text{ mA} + 12\text{ mA} = \mathbf{17\text{ mA}}$$

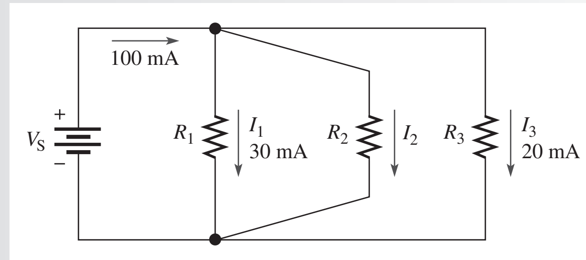
La corriente total que sale del nodo *B* es la suma de las dos corrientes de rama. Así, la corriente total que sale del nodo *B* es

$$I_T = I_1 + I_2 = 5\text{ mA} + 12\text{ mA} = \mathbf{17\text{ mA}}$$

Observe que la ecuación puede ser expresada de forma equivalente como $I_T - I_1 - I_2 = 0$.

Problema relacionado Si se agrega una tercer rama al circuito de la figura 6-15 y su corriente es de 3 mA, ¿cuál es la corriente total que entra al nodo *A* y sale del nodo *B*?

EJEMPLO 6–5 Determine la corriente I_2 a través de R_2 en la figura 6-16.



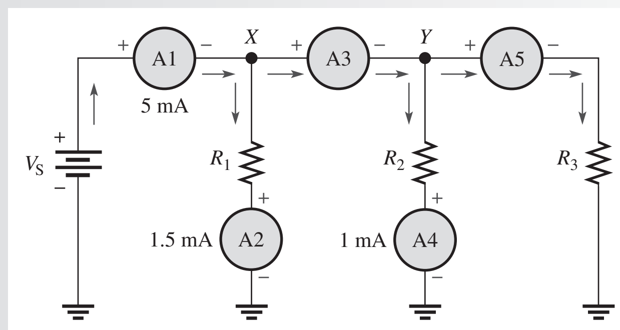
▲ FIGURA 6–16

Solución La corriente total que entra a la unión de las tres ramas es $I_T = I_1 + I_2 + I_3$. De la figura 6-16, se conoce la corriente total y las corrientes de rama R_1 y R_3. Resuelva para I_2 como sigue:

$$I_2 = I_T - I_1 - I_3 = 100\text{ mA} - 30\text{ mA} - 20\text{ mA} = \mathbf{50\text{ mA}}$$

Problema relacionado Determine I_T e I_2 si se agrega una cuarta rama al circuito de la figura 6-16 y circula una corriente de 12 mA a través de él.

EJEMPLO 6–6 Use la ley de la corriente de Kirchhoff para calcular las corrientes medidas por los amperímetros A3 y A5 mostrados en la figura 6-17.



▲ FIGURA 6–17

Solución La corriente total que entra el nodo X es de 5 mA. Del nodo X salen dos corrientes: 1.5 mA a través del resistor R_1 y la corriente que circula por A3. La ley de la corriente de Kirchhoff aplicada al nodo X da

$$5\text{ mA} = 1.5\text{ mA} + I_{A3}$$

Al resolver para I_{A3} se obtiene

$$I_{A3} = 5\text{ mA} - 1.5\text{ mA} = \mathbf{3.5\text{ mA}}$$

La corriente total que entra al nodo Y es $I_{A3} = 3.5$ mA. Dos corrientes salen del nodo Y: 1 mA a través del resistor R_2 y la corriente que circula por A5 y R_3. La ley de la corriente de Kirchhoff aplicada al nodo Y da

$$3.5 \text{ mA} = 1 \text{ mA} + I_{A5}$$

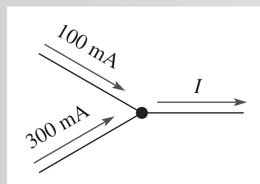
Al resolver para I_{A5} se obtiene

$$I_{A5} = 3.5 \text{ mA} - 1 \text{ mA} = \mathbf{2.5\ mA}$$

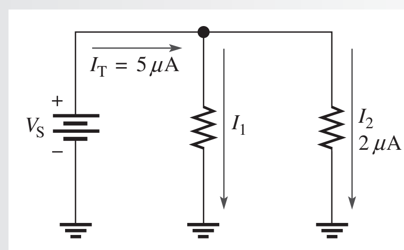
Problema relacionado En la figura 6-17, ¿cuánta corriente medirá un amperímetro cuando se le coloque en el circuito justo debajo de R_3? ¿Debajo de la terminal negativa de la batería?

REPASO DE LA SECCIÓN 6-3

1. Establezca la ley de las corrientes de Kirchhoff de dos maneras.
2. Existe una corriente total de 2.5 mA que entra a un nodo, y la corriente que sale del nodo se divide en tres ramas en paralelo. ¿Cuál es la suma de las tres corrientes de rama?
3. En la figura 6-18, 100 mA y 300 mA entran al nodo. ¿Qué cantidad de corriente sale del nodo?
4. Determine I_1 en el circuito de la figura 6-19.
5. Dos corrientes de rama entran a un nodo, y dos corrientes de rama salen del mismo nodo. Una de las corrientes que entran al nodo es de 1 mA, y una de las corrientes que salen de ese nodo mide 3 mA. La corriente total que entra al, y sale del, nodo es de 8 mA. Determine el valor de la corriente desconocida que entra al nodo y el valor de la corriente desconocida que sale de tal nodo.



▲ FIGURA 6–18



▲ FIGURA 6–19

6–4 RESISTENCIA TOTAL EN PARALELO

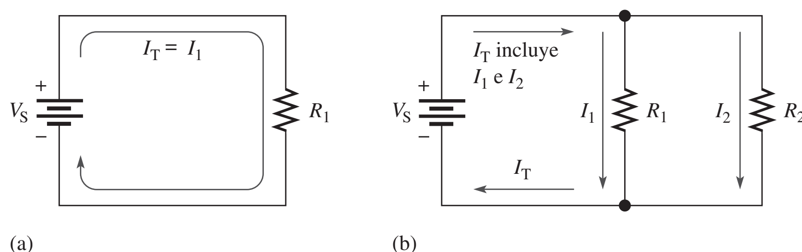
Cuando se conectan resistores en paralelo, la resistencia total del circuito se reduce. La resistencia total de un circuito dispuesto en paralelo siempre es menor que el valor del resistor más pequeño. Por ejemplo, si un resistor de 10 Ω y otro de 100 Ω se conectan en paralelo, la resistencia total es menor que 10 Ω.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la resistencia total en paralelo**
  - Explicar por qué se reduce la resistencia a medida que se conectan resistores en paralelo
  - Aplicar la fórmula de la resistencia en paralelo

Como se sabe, cuando se conectan resistores en paralelo, la corriente dispone de más de una trayectoria. El número de trayectorias para la corriente es igual al número de ramas en paralelo.

En la figura 6-20(a), hay sólo una trayectoria para corriente porque es un circuito en serie. Existe cierta cantidad de corriente, I_1, a través de R_1. Si el resistor R_2 se conecta en paralelo con R_1, como indica la figura 6-20(b), existe una corriente adicional de corriente, I_2, a través de R_2. La corriente total suministrada por la fuente se ha incrementado con la adición del resistor en paralelo. Suponiendo que el voltaje de fuente permanece constante, un incremento de la corriente total suministrada por la fuente significa que la resistencia total ha disminuido, de acuerdo con la ley de Ohm. La conexión de más resistores en paralelo reducirá aún más la resistencia e incrementará la corriente total.



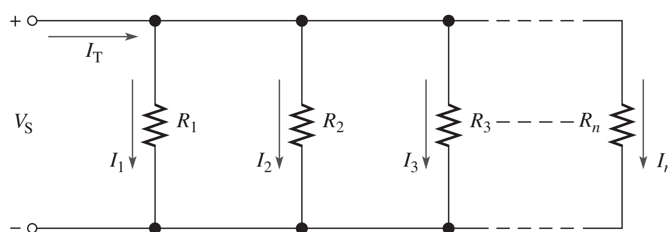
▲ **FIGURA 6–20**

La adición de resistores en paralelo reduce la resistencia total e incrementa la corriente total.

Fórmula de la resistencia total en paralelo

El circuito mostrado en la figura 6-21 ilustra un caso general de *n* resistores en paralelo (*n* puede ser cualquier número). De acuerdo con la ley de las corrientes de Kirchhoff, la ecuación para corriente es

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n$$



▲ **FIGURA 6–21**

Circuito con *n* resistores en paralelo.

Como V_S es el voltaje a través de cada uno de los resistores en paralelo, de acuerdo con la ley de Ohm, $I_1 = V_S/R_1$, $I_2 = V_S/R_2$, y así sucesivamente. Por sustitución en la ecuación para corriente,

$$\frac{V_S}{R_T} = \frac{V_S}{R_1} + \frac{V_S}{R_2} + \frac{V_S}{R_3} + \cdots + \frac{V_S}{R_n}$$

El término V_S puede ser factorizado en el lado derecho de la ecuación y se elimina con V_S del lado izquierdo, dejando únicamente los términos de resistencia.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

Recuerde que el recíproco de la resistencia ($1/R$) se llama *conductancia*, la cual es simbolizada por G. La unidad de conductancia es el siemens (S)(o el mho). La ecuación para $1/R_T$ puede ser expresada en función de la conductancia como

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$$

Resuelva para R_T al tomar el recíproco de (es decir, invirtiendo) ambos lados de la ecuación para $1/R_T$.

Ecuación 6–2

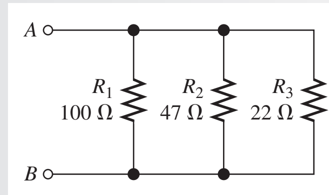
$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{R_n}\right)}$$

La ecuación 6-2 muestra que para determinar la resistencia total en paralelo, se suman todos los términos $1/R$ (o conductancia, G) y luego se toma el recíproco de la suma

$$R_T = \frac{1}{G_T}$$

EJEMPLO 6–7 Calcule la resistencia total en paralelo entre los puntos A y B del circuito de la figura 6-22.

▶ FIGURA 6–22



Solución Use la ecuación 6-2 para calcular la resistencia total en paralelo cuando se conocen las resistencias individuales. Primero, calcule la conductancia, que es el recíproco de la resistencia, de cada uno de los tres resistores.

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{100\ \Omega} = 10\ \text{mS}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{47\ \Omega} = 21.3\ \text{mS}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{22\ \Omega} = 45.5\ \text{mS}$$

A continuación, calcule R_T sumando G_1, G_2 y G_3 y tomando el recíproco de la suma.

$$R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{10\ \text{mS} + 21.3\ \text{mS} + 45.5\ \text{mS}} = \frac{1}{76.8\ \text{mS}} = \mathbf{13.0\ \Omega}$$

Para una rápida verificación de la precisión, observe que el valor de R_T (13.0 Ω) es más pequeño que el valor más pequeño en paralelo, el cual es R_3 (22 Ω), como debe ser.

Problema relacionado Si en la figura 6-22 se conecta un resistor de 33 Ω en paralelo, ¿cuál es el nuevo valor de R_T?

Consejo para usuarios de calculadora

La fórmula de la resistencia en paralelo es fácil de resolver con una calculadora utilizando la ecuación 6-2. El procedimiento general es ingresar el valor de R_1 y luego tomar su recíproco oprimiendo la tecla x^{-1}. (En algunas calculadoras, el recíproco es una función secundaria). A continuación se oprime la tecla $+$; luego se ingresa el valor de R_2 y se toma su recíproco con la tecla x^{-1} y se oprime la tecla $+$. Se repite este procedimiento hasta que todos los valores de resistor han sido ingresados; luego se oprime ENTER. El paso final es oprimir la tecla x^{-1} y la tecla ENTER para obtener R_T. La resistencia total en paralelo aparece entonces en la pantalla. El formato de visualización puede variar, según la calculadora en particular. Por ejemplo, los pasos requeridos para encontrar una solución típica con calculadora para el ejemplo 6-7 son los siguientes:

1. Ingresar 100. La pantalla muestra 100.
2. Oprimir x^{-1} (o 2nd y luego x^{-1}). La pantalla muestra 100^{-1}.
3. Oprimir $+$. La pantalla muestra $100^{-1}+$.
4. Ingresar 47. La pantalla muestra $100^{-1} + 47$.
5. Oprimir x^{-1} (o 2nd y luego x^{-1}). La pantalla muestra $100^{-1} + 47^{-1}$.
6. Oprimir $+$. La pantalla muestra $100^{-1} + 47^{-1} +$.
7. Ingresar 22. La pantalla muestra $100^{-1} + 47^{-1} + 22$.
8. Oprimir x^{-1}(o 2nd y luego x^{-1}). La pantalla muestra $100^{-1} + 47^{-1} + 22^{-1}$.
9. Oprima ENTER. La pantalla muestra el resultado de 76.7311411992E^{-3}.
10. Oprima x^{-1} (o 2nd y luego x^{-1}) y luego ENTER. La pantalla muestra un resultado de 13.0325182758E0.

El número que aparece en el paso 10 es la resistencia total en ohms. Se redondea a 13.0 Ω.

El caso de dos resistores en paralelo

La ecuación 6-2 es la fórmula general para determinar la resistencia total de cualquier número de resistores en paralelo. La combinación de dos resistores en paralelo ocurre comúnmente en la práctica. Asimismo, cualquier número de resistores en paralelo puede ser descompuesto en pares como una forma alterna de encontrar R_T. Con base en la ecuación 6-2, la fórmula de la resistencia total de dos resistores en paralelo es

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right)}$$

Combinando los términos del denominador se obtiene

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}\right)}$$

La cual puede ser reescrita como sigue:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$ **Ecuación 6–3**

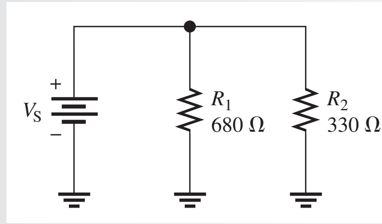
La ecuación 6-3 expresa que

La resistencia total de dos resistores en paralelo es igual al producto de los dos resistores dividido entre la suma de los dos resistores.

La ecuación es denominada en ocasiones como fórmula del “producto sobre la suma”.

EJEMPLO 6–8 Calcule la resistencia conectada a la fuente de voltaje del circuito mostrado en la figura 6-23.

▶ **FIGURA 6–23**



Solución Use la ecuación 6-3.

$$R_T = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(680\ \Omega)(330\ \Omega)}{680\ \Omega + 330\ \Omega} = \frac{224{,}400\ \Omega^2}{1010\ \Omega} = \mathbf{222\ \Omega}$$

Problema relacionado Determine R_T si un resistor de 220 Ω reemplaza a R_1 en la figura 6-23.

El caso de resistores en paralelo que tienen igual valor

Otro caso especial de circuitos en paralelo es la conexión en paralelo de varios resistores que tienen cada uno el mismo valor de resistencia. Existe un método abreviado para calcular R_T cuando ello ocurre.

Si varios resistores en paralelo tienen la misma resistencia, se les puede asignar el mismo símbolo R. Por ejemplo, $R_1 = R_2 = R_3 = \cdots = R_n = R$. Iniciando con la ecuación 6-2, se puede desarrollar una fórmula especial para calcular R_T.

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right) + \left(\frac{1}{R}\right) + \left(\frac{1}{R}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{R}\right)}$$

Observe que en el denominador, el mismo término, $1/R$, se suma n veces (n es la cantidad de resistores de igual valor dispuestos en paralelo). Por consiguiente, la fórmula puede escribirse como

$$R_T = \frac{1}{n/R}$$

o

Ecuación 6–4

$$R_T = \frac{R}{n}$$

La ecuación 6-4 establece que cuando cualquier número de resistores (n) de la misma resistencia (R) se conectan en paralelo, R_T es igual a la resistencia dividida entre el número de resistores en paralelo.

EJEMPLO 6–9 Cuatro altavoces de 8 Ω se conectan en paralelo a la salida de un amplificador. ¿Cuál es la resistencia total en la salida del amplificador?

Solución Hay cuatro resistores de 8 Ω dispuestos en paralelo. Use la ecuación 6-4 como sigue:

$$R_T = \frac{R}{n} = \frac{8\ \Omega}{4} = \mathbf{2\ \Omega}$$

Problema relacionado Si se quitan dos de los altavoces, ¿cuál es la resistencia en la salida?

Determinación de un resistor en paralelo desconocido

En algunas ocasiones se necesita determinar los valores de resistores que han de ser combinados para producir una resistencia total deseada. Por ejemplo, se utilizan dos resistores en paralelo para obtener una resistencia total conocida. Si se conoce o elige arbitrariamente el valor de un resistor, entonces se puede calcular el segundo valor del resistor utilizando la ecuación 6-3 para dos resistores en paralelo. La fórmula para determinar el valor de un resistor desconocido R_x se desarrolla como sigue:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_x}$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_A}$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{R_A - R_T}{R_A R_T}$$

$$R_x = \frac{R_A R_T}{R_A - R_T}$$

Ecuación 6–5

donde R_x es el resistor incógnita y R_A es el valor conocido o seleccionado.

EJEMPLO 6–10

Suponga que se desea obtener una resistencia tan cercana a 150 Ω como sea posible combinando dos resistores en paralelo. Está disponible un resistor de 330 Ω. ¿Qué otro valor se necesita?

Solución

$R_T = 150\ \Omega$ y $R_A = 330\ \Omega$. Por consiguiente,

$$R_x = \frac{R_A R_T}{R_A - R_T} = \frac{(330\ \Omega)(150\ \Omega)}{330\ \Omega - 150\ \Omega} = 275\ \Omega$$

El valor estándar más cercano es de **270 Ω**.

Problema relacionado

Si usted necesita obtener una resistencia total de 130 Ω, ¿qué valor puede sumar en paralelo para la combinación en paralelo de 330 Ω y 270 Ω? En primer lugar, calcule el valor de 330 Ω y 270 Ω en paralelo, y trate dicho valor como un solo resistor.

Notación para resistores en paralelo

En ocasiones, por conveniencia, los resistores en paralelo se designan mediante dos marcas verticales. Por ejemplo, R_1 en paralelo con R_2 puede ser escrito como $R_1 \| R_2$. Además, cuando varios resistores están en paralelo entre sí, se puede utilizar esta notación. Por ejemplo,

$$R_1 \| R_2 \| R_3 \| R_4 \| R_5$$

indica que los resistores R_1 a R_5 están en paralelo.

Esta notación también se utiliza con valores de resistencia. Por ejemplo,

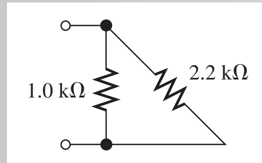
$$10\ \text{k}\Omega \| 5\ \text{k}\Omega$$

significa que un resistor de 10 kΩ está en paralelo con un resistor de 5 kΩ.

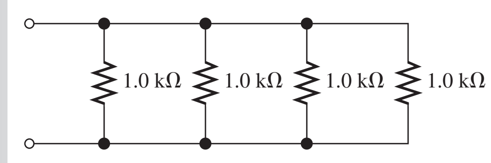
REPASO DE LA SECCIÓN 6-4

1. ¿Se incrementa o disminuye la resistencia total a medida que se conectan más resistores en paralelo?
2. ¿La resistencia total en paralelo siempre es menor a qué valor?
3. Escriba la fórmula para R_T con cualquier número de resistores en paralelo.

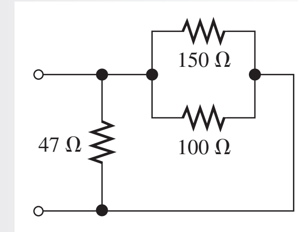
4. Escriba la fórmula especial para dos resistores en paralelo.
5. Escriba la fórmula especial para cualquier cantidad de resistores de igual valor dispuestos en paralelo.
6. Calcule R_T para la figura 6-24.
7. Determine R_T para la figura 6-25.
8. Encuentre R_T para la figura 6-26.



▲ FIGURA 6–24



▲ FIGURA 6–25



▲ FIGURA 6–26

6–5 APLICACIÓN DE LA LEY DE OHM

La ley de Ohm puede ser aplicada al análisis de circuitos en paralelo.

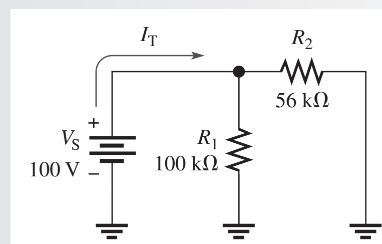
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar la ley de Ohm en un circuito en paralelo**
  - Encontrar la corriente total en un circuito en paralelo
  - Encontrar cada corriente de rama en un circuito en paralelo
  - Encontrar el voltaje a través de un circuito en paralelo
  - Encontrar la resistencia de un circuito en paralelo

Los siguientes ejemplos ilustran cómo aplicar la ley de Ohm para determinar la corriente total, las corrientes de rama, el voltaje, y la resistencia en circuitos en paralelo.

EJEMPLO 6–11 Encuentre la corriente total producida por la batería de la figura 6-27.

▶ FIGURA 6–27



Solución La batería "ve" una resistencia total en paralelo que determina la cantidad de corriente a generar. Primero, calcule R_T.

$$R_T = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(100\text{ k}\Omega)(56\text{ k}\Omega)}{100\text{ k}\Omega + 56\text{ k}\Omega} = \frac{5600\text{ k}\Omega^2}{156\text{ k}\Omega} = 35.9\text{ k}\Omega$$

El voltaje de la batería es de 100 V. Use la ley de Ohm para calcular I_T.

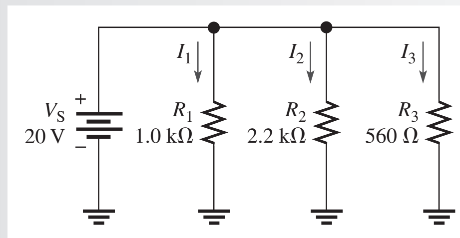
$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{100\text{ V}}{35.9\text{ k}\Omega} = \mathbf{2.79\text{ mA}}$$

Problema relacionado ¿Cuál es I_T en la figura 6-27 si R_2 cambia a 120 kΩ? ¿Cuál es la corriente a través de R_1?



Use el archivo Multisim E06-11 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 6–12 Determine la corriente que circula por cada resistor en el circuito en paralelo de la figura 6-28.



▲ FIGURA 6–28

Solución El voltaje a través de cada resistor (rama) es igual al voltaje de fuente. Es decir, el voltaje a través de R_1 es de 20 V, el voltaje a través de R_2 es de 20 V, y el voltaje a través de R_3 es de 20 V. La corriente que circula en cada resistor se determina como sigue:

$$I_1 = \frac{V_S}{R_1} = \frac{20\text{ V}}{1.0\text{ k}\Omega} = \mathbf{20\text{ mA}}$$

$$I_2 = \frac{V_S}{R_2} = \frac{20\text{ V}}{2.2\text{ k}\Omega} = \mathbf{9.09\text{ mA}}$$

$$I_3 = \frac{V_S}{R_3} = \frac{20\text{ V}}{560\ \Omega} = \mathbf{35.7\text{ mA}}$$

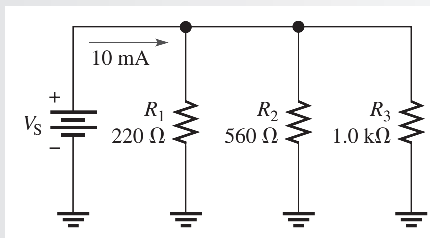
Problema relacionado Si se conecta un resistor adicional de 910 Ω en paralelo con el circuito de la figura 6-28, determine todas las corrientes de rama.



Use el archivo Multisim E06-12 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

EJEMPLO 6–13 Encuentre el voltaje V_S a través del circuito en paralelo de la figura 6-29.

▶ FIGURA 6–29



Solución La corriente total que entra al circuito en paralelo es de 10 mA. Si se conoce la resistencia total entonces es posible aplicar la ley de Ohm para obtener el voltaje. La resistencia total es

$$R_T = \frac{1}{G_1 + G_2 + G_3}$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right)}$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{1}{220\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{560\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{1.0\ \text{k}\Omega}\right)}$$

$$= \frac{1}{4.55\ \text{mS} + 1.79\ \text{mS} + 1\ \text{mS}} = \frac{1}{7.34\ \text{mS}} = 136\ \Omega$$

Por consiguiente, el voltaje de fuente es

$$V_S = I_T R_T = (10\ \text{mA})(136\ \Omega) = \mathbf{1.36\ V}$$

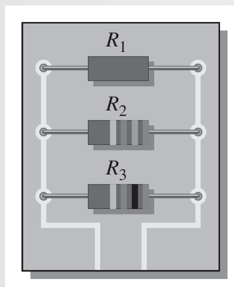
Problema relacionado Encuentre el voltaje si R_3 se reduce a 680 Ω en la figura 6-29 e I_T es de 10 mA.



Use el archivo Multisim E06-13 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 6–14 La tarjeta de circuito impreso de la figura 6-30 tiene tres resistores en paralelo. Los valores de dos de los resistores son conocidos por su bandas de color, pero el resistor de la parte superior no está marcado con claridad (tal vez las bandas se desgastaron en el manejo). Determine el valor del resistor desconocido R_1 utilizando sólo un amperímetro y una fuente de potencia de cd.

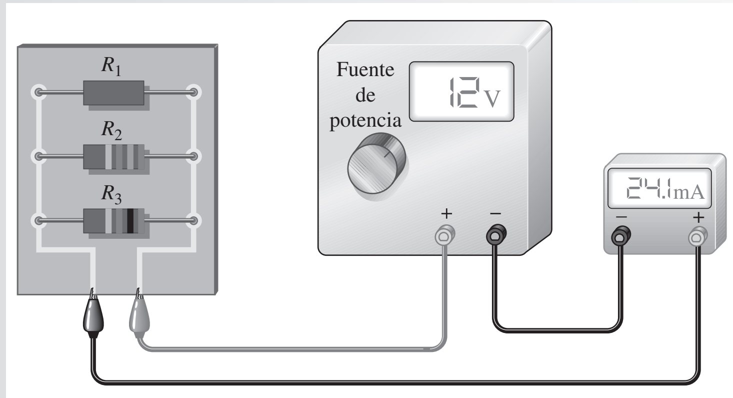
▶ FIGURA 6–30



Solución Si puede determinar la resistencia total de los tres resistores en paralelo, entonces puede utilizar la fórmula de resistencia en paralelo para calcular la resistencia desconocida. Puede aplicar la ley de Ohm para determinar la resistencia total cuando se conocen el voltaje y la corriente total.

En la figura 6-31, se conecta una fuente de 12 V (valor arbitrario) a través de los resistores y se mide la resistencia total. Con estos valores medidos, encuentre la resistencia total.

$$R_T = \frac{V}{I_T} = \frac{12\text{ V}}{24.1\text{ mA}} = 498\ \Omega$$



▲ **FIGURA 6–31**

Encuentre la resistencia desconocida como sigue:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} = \frac{1}{498\ \Omega} - \frac{1}{1.8\text{ k}\Omega} - \frac{1}{1.0\text{ k}\Omega} = 453\ \mu\text{S}$$

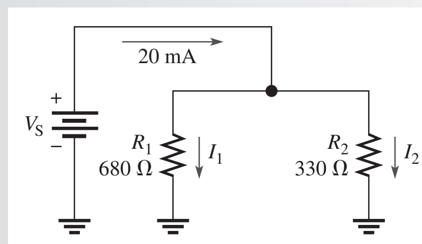
$$R_1 = \frac{1}{453\ \mu\text{S}} = \mathbf{2.21\ k\Omega}$$

Problema relacionado Explique cómo determinar el valor de R_1 con un voltímetro y sin quitar R_1 del circuito.

REPASO DE LA SECCIÓN 6-5

1. Se conecta una batería de 10 V a través de tres resistores de 680 Ω que están en paralelo. ¿Cuál es la corriente total producida por la batería?
2. ¿Cuánto voltaje se requiere para producir 20 mA de corriente a través del circuito de la figura 6-32?

▶ **FIGURA 6–32**



3. ¿Cuánta corriente circula por cada resistor de la figura 6-32?
4. Hay cuatro resistores de igual valor en paralelo con una fuente de 12 V y con 5.85 mA de corriente producida por la fuente. ¿Cuál es el valor de cada resistor?
5. Se conecta un resistor de 1.0 kΩ y otro de 2.2 kΩ en paralelo. A través de la combinación en paralelo circulan 100 mA. ¿Cuál es la caída de voltaje a través de los resistores?

6–6 FUENTES DE CORRIENTE EN PARALELO

Tal como se aprendió en el capítulo 2, una fuente de corriente es un tipo de fuente de energía que suministra una corriente constante a una carga aun cuando la resistencia de dicha carga cambie. Se puede utilizar un transistor como fuente de corriente; por tanto, las fuentes de corriente son importantes en circuitos electrónicos. Aunque el estudio de transistores queda fuera del alcance de este libro, se deberá entender cómo actúan las fuentes de corriente en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar el efecto total de fuentes de corriente en paralelo**
  - Determinar la corriente total producida por fuentes en paralelo que tengan la misma dirección
  - Determinar la corriente total producida por fuentes en paralelo que tengan direcciones opuestas

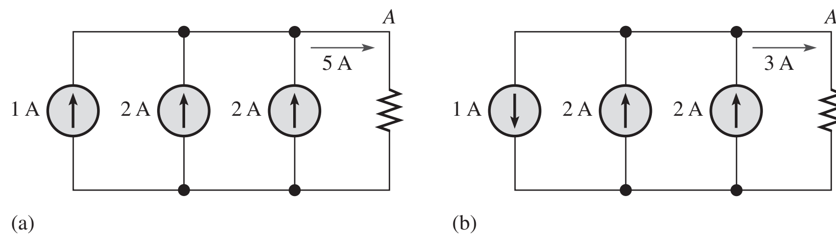
En general, la corriente total producida por fuentes de corriente en paralelo es igual a la suma algebraica de las fuentes de corriente individuales. La suma algebraica implica que se debe considerar la dirección de la corriente cuando se combinan las fuentes en paralelo. Por ejemplo, en la figura 6-33(a), las tres fuentes de corriente en paralelo suministran corriente en la misma dirección (hacia el nodo *A*). De modo que la corriente hacia el nodo *A* es

$$I_T = 1\text{ A} + 2\text{ A} + 2\text{ A} = 5\text{ A}$$

En la figura 6-33(b), la fuente de 1 A suministra corriente en dirección opuesta a las otras dos fuentes. La corriente total hacia el nodo *A* en este caso es

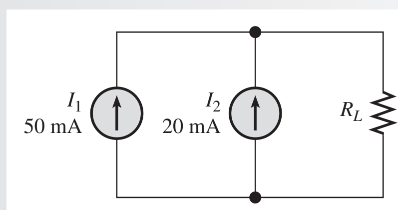
$$I_T = 2\text{ A} + 2\text{ A} - 1\text{ A} = 3\text{ A}$$

▶ **FIGURA 6–33**



EJEMPLO 6–15 Determine la corriente a través de R_L en la figura 6-34.

▶ **FIGURA 6–34**



Solución Las dos fuentes de corriente están en la misma dirección; por lo que la corriente a través de R_L es

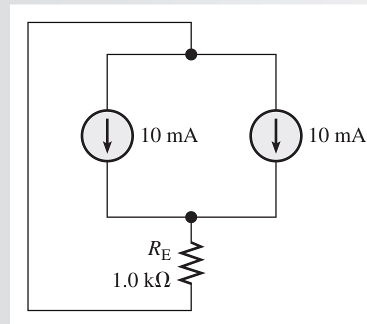
$$I_{R_L} = I_1 + I_2 = 50\text{ mA} + 20\text{ mA} = \mathbf{70\text{ mA}}$$

Problema relacionado Determine la corriente a través de R_L si se invierte la dirección de I_2.

REPASO DE LA SECCIÓN 6-6

1. Se conectan en paralelo cuatro fuentes de corriente de 0.5 A en la misma dirección. ¿Qué corriente se producirá a través de un resistor de carga?
2. ¿Cuántas fuentes de corriente de 100 mA deben conectarse en paralelo para producir una salida de corriente total de 300 mA? Trace un diagrama esquemático que muestre las fuentes conectadas.
3. En cierto circuito amplificador de transistor, éste puede ser representado por una fuente de corriente de 10 mA, como se muestra en la figura 6-35. En cierto amplificador de transistor, dos transistores actúan en paralelo. ¿Cuánta corriente circula por el resistor R_E?

▶ FIGURA 6–35



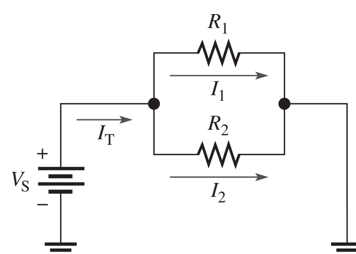
6–7 DIVISORES DE CORRIENTE

Un circuito en paralelo actúa como divisor de corriente porque la corriente que entra a la unión de ramas dispuestas en paralelo "se divide" en varias corrientes individuales.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar un circuito en paralelo como divisor de corriente**
  - Aplicar la fórmula del divisor de corriente
  - Determinar el valor desconocido de una corriente de rama

En un circuito en paralelo, la corriente total dirigida hacia la unión de las ramas dispuestas en paralelo se divide entre las ramas. Por tanto, un circuito en paralelo actúa como **divisor de corriente**. Este principio de divisor de corriente se ilustra en la figura 6-36 para un circuito en paralelo de dos ramas, en el cual una parte de la corriente total I_T se va por R_1 y otra por R_2.



◀ FIGURA 6–36

La corriente total se divide entre las dos ramas.

Como el voltaje es el mismo a través de cada uno de los resistores en paralelo, las corrientes de rama son inversamente proporcionales a los valores de los resistores. Por ejemplo, si el valor de R_2 es dos veces el de R_1, entonces el valor de I_2 es la mitad del valor de I_1. En otras palabras,

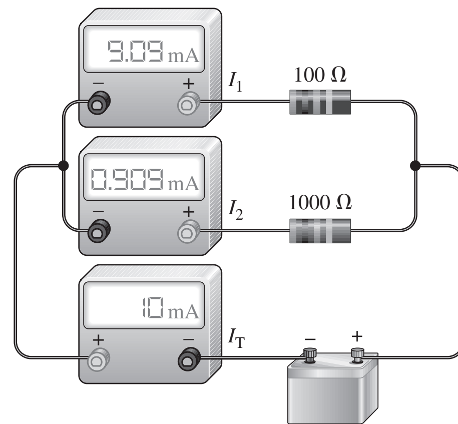
Entre los resistores en paralelo, la corriente total se divide en corrientes con valores que son inversamente proporcionales a los valores de resistencia.

Las ramas con más alta resistencia tienen menos corriente, y las ramas con más baja resistencia tienen más corriente, de acuerdo con la ley de Ohm. Si todas las ramas tienen la misma resistencia, las corrientes de rama son iguales.

La figura 6-37 muestra valores específicos para demostrar cómo se dividen las corrientes de acuerdo con las resistencias de rama. Observe que en este caso la resistencia de la rama superior es un décimo de la resistencia de la rama inferior, pero la corriente en la rama superior es diez veces la corriente en la rama inferior.

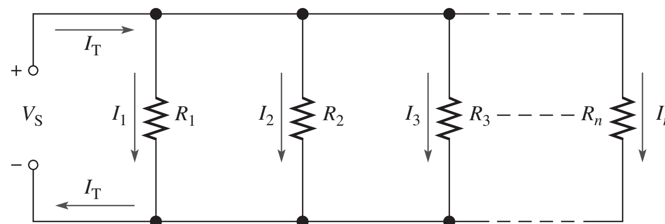
▶ **FIGURA 6–37**

La rama con más baja resistencia tiene más corriente, y la rama con más alta resistencia tiene menos corriente.



Fórmula del divisor de corriente

Se puede desarrollar una fórmula para determinar cómo se dividen las corrientes entre cualquier número de resistores en paralelo como indica la figura 6-38, donde n es el número total de resistores.



▲ **FIGURA 6–38**

Circuito en paralelo con *n* ramas.

La corriente a través de cualquiera de los resistores en paralelo es I_x, donde x representa el número de un resistor en particular (1, 2, 3, y así sucesivamente). Mediante la ley de Ohm, se puede expresar la corriente a través de cualquiera de los resistores que aparecen en la figura 6-38 como sigue:

$$I_x = \frac{V_S}{R_x}$$

El voltaje de fuente, V_S, aparece a través de cada uno de los resistores en paralelo, y R_x representa cualquiera de estos resistores. El voltaje total de la fuente, V_S, es igual a la corriente total multiplicada por la resistencia total en paralelo.

$$V_S = I_T R_T$$

Sustituir V_S por $I_T R_T$ en la expresión para I_x resulta en

$$I_x = \frac{I_T R_T}{R_x}$$

Al reordenar los términos se obtiene

$$I_x = \left(\frac{R_T}{R_x}\right) I_T$$ **Ecuación 6–6**

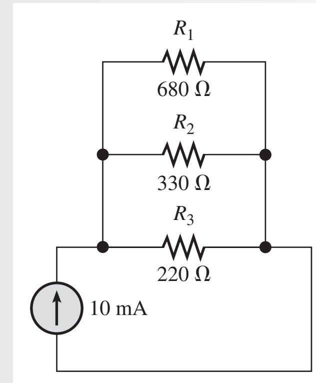
donde $x = 1, 2, 3$, etcétera.

La ecuación 6-6 es la fórmula general del divisor de corriente y se aplica a circuitos en paralelo con cualquier número de ramas.

La corriente (I_x) a través de cualquier rama es igual a la resistencia total en paralelo (R_T) dividida entre la resistencia (R_x) de dicha rama, y multiplicada entonces por la corriente total (I_T) que entra a la unión de ramas en paralelo.

EJEMPLO 6–16 Determine la corriente que circula por cada resistor en el circuito de la figura 6-39.

▶ FIGURA 6–39



Solución Primero calcule la resistencia total en paralelo.

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{680\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{330\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{220\ \Omega}\right)} = 111\ \Omega$$

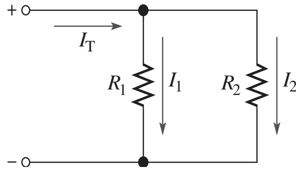
La corriente total es de 10 mA. Use la ecuación 6-6 para calcular cada corriente de rama.

$$I_1 = \left(\frac{R_T}{R_1}\right) I_T = \left(\frac{111\ \Omega}{680\ \Omega}\right) 10\ \text{mA} = \mathbf{1.63\ mA}$$

$$I_2 = \left(\frac{R_T}{R_2}\right) I_T = \left(\frac{111\ \Omega}{330\ \Omega}\right) 10\ \text{mA} = \mathbf{3.36\ mA}$$

$$I_3 = \left(\frac{R_T}{R_3}\right) I_T = \left(\frac{111\ \Omega}{220\ \Omega}\right) 10\ \text{mA} = \mathbf{5.05\ mA}$$

Problema relacionado Determine la corriente que circula por cada resistor presente en la figura 6-39 si R_3 se quita.



▲ FIGURA 6–40

Fórmulas del divisor de corriente con dos ramas Dos resistores en paralelo son comunes en circuitos prácticos, como indica la figura 6-40. Como se sabe por la ecuación 6-3,

$$R_T = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}$$

Al utilizar la fórmula general del divisor de corriente en la ecuación 6-6, las fórmulas para I_1 e I_2 se escriben como sigue:

$$I_1 = \left(\frac{R_T}{R_1}\right)I_T \qquad \text{y} \qquad I_2 = \left(\frac{R_T}{R_2}\right)I_T$$

Al sustituir R_T por $R_1R_2/(R_1 + R_2)$ y eliminar términos se obtiene

$$I_1 = \frac{\left(\dfrac{\cancel{R_1}R_2}{R_1 + R_2}\right)}{\cancel{R_1}}I_T \qquad \text{y} \qquad I_2 = \frac{\left(\dfrac{R_1\cancel{R_2}}{R_1 + R_2}\right)}{\cancel{R_2}}I_T$$

Por consiguiente, las fórmulas del divisor de corriente para el caso especial de dos ramas son

Ecuación 6–7

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)I_T$$

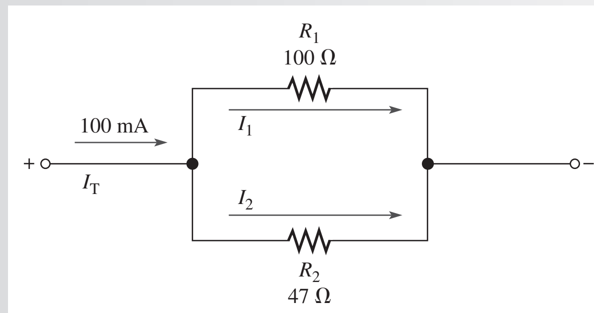
Ecuación 6–8

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)I_T$$

Observe que en las ecuaciones 6-7 y 6-8, la corriente en una de las ramas es igual a la resistencia de la rama opuesta dividida entre la suma de los dos resistores, multiplicado todo por la corriente total. En todas las aplicaciones de las ecuaciones del divisor de corriente, se debe conocer la corriente total que se dirige a las ramas en paralelo.

EJEMPLO 6–17 Encuentre I_1 e I_2 en la figura 6-41.

▶ FIGURA 6–41



Solución Use la ecuación 6-7 para determinar I_1:

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)I_T = \left(\frac{47\ \Omega}{147\ \Omega}\right)100\text{ mA} = \mathbf{32.0\ mA}$$

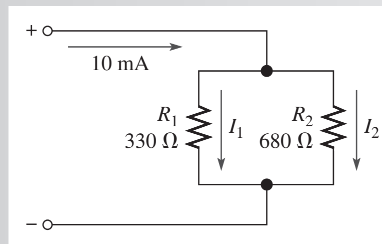
Y la ecuación 6-8 para determinar I_2.

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)I_T = \left(\frac{100\ \Omega}{147\ \Omega}\right)100\text{ mA} = \mathbf{68.0\ mA}$$

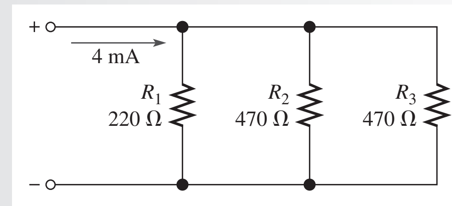
Problema relacionado Si en la figura 6-41 $R_1 = 56\ \Omega$, $R_2 = 82\ \Omega$, e I_T no cambia, ¿cuál será la corriente en cada rama?

REPASO DE LA SECCIÓN 6-7

1. Escriba la fórmula general del divisor de corriente.
2. Escriba dos fórmulas especiales para calcular cada corriente de rama para un circuito de dos ramas.
3. Un circuito tiene los siguientes resistores en paralelo con una fuente de voltaje: 220 kΩ, 100 kΩ, 82 kΩ, 47 kΩ y 22 kΩ. ¿Cuál resistor tiene más corriente a través de él? ¿Menos corriente?
4. Encuentre I_1 e I_2 en el circuito de la figura 6-42.
5. Determine la corriente a través de R_3 en la figura 6-43.



▲ FIGURA 6–42



▲ FIGURA 6–43

6–8 POTENCIA EN CIRCUITOS EN PARALELO

La potencia total presente en un circuito en paralelo se encuentra sumando las potencias de todos los resistores individuales, tal como en los circuitos en serie.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la potencia en un circuito en paralelo**

La ecuación 6-9 expresa la fórmula para determinar la potencia total en una forma concisa para cualquier cantidad de resistores dispuestos en paralelo,

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$$ **Ecuación 6–9**

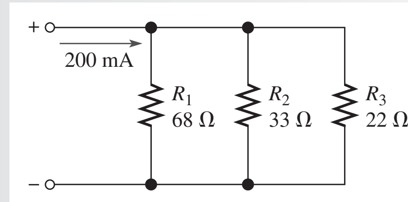
donde P_T es la potencia total y P_n es la potencia en el último resistor en paralelo. Como se puede ver, las potencias son aditivas, igual que en un circuito en serie.

Las fórmulas de potencia presentadas en el capítulo 4 son directamente aplicables a circuitos en paralelo. Se utilizan las fórmulas siguientes para calcular la potencia total, P_T:

$$P_T = VI_T$$
$$P_T = I_T^2 R_T$$
$$P_T = \frac{V^2}{R_T}$$

donde V es el voltaje a través del circuito en paralelo, I_T es la corriente total que entra al circuito en paralelo, y R_T es la resistencia total del circuito en paralelo. Los ejemplos 6-18 y 6-19 muestran cómo se calcula la potencia total en un circuito en paralelo.

EJEMPLO 6–18 Determine la cantidad de potencia total presente en el circuito en paralelo de la figura 6-44.



▲ **FIGURA 6–44**

Solución La corriente total es de 200 mA. La resistencia total es

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{68\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{33\ \Omega}\right) + \left(\frac{1}{22\ \Omega}\right)} = 11.1\ \Omega$$

La fórmula más fácil de utilizar para el cálculo de la potencia es $P_T = I_T^2 R_T$ porque I_T y R_T son conocidas.

$$P_T = I_T^2 R_T = (200\ \text{mA})^2(11.1\ \Omega) = \mathbf{444\ mW}$$

Demuestre que si se determina la potencia presente en cada resistor y se suman todos esos valores, se obtiene el mismo resultado. Primero, calcule el voltaje a través de cada rama del circuito.

$$V = I_T R_T = (200\ \text{mA})(11.1\ \Omega) = 2.22\ \text{V}$$

Recuerde que el voltaje es el mismo en todas las ramas.

A continuación, use $P = V^2/R$ para calcular la potencia en cada resistor.

$$P_1 = \frac{(2.22\ \text{V})^2}{68\ \Omega} = 72.5\ \text{mW}$$

$$P_2 = \frac{(2.22\ \text{V})^2}{33\ \Omega} = 149\ \text{mW}$$

$$P_3 = \frac{(2.22\ \text{V})^2}{22\ \Omega} = 224\ \text{mW}$$

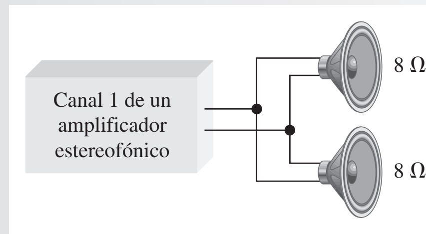
Sume estas potencias para obtener la potencia total.

$$P_T = 72.5\ \text{mW} + 149\ \text{mW} + 224\ \text{mW} = 446\ \text{mW}$$

Este cálculo indica que la suma de las potencias individuales es igual (aproximadamente) a la potencia total determinada mediante una de las fórmulas de potencia. El redondeo a tres cifras significativas indica la diferencia.

Problema relacionado Encuentre la potencia total en la figura 6-44 si la corriente se duplica.

EJEMPLO 6–19 En un canal de un sistema estereofónico, el amplificador controla dos altavoces, como indica la figura 6-45. Si el voltaje máximo* suministrado a los altavoces es de 15 V, ¿cuánta potencia debe ser capaz de suministrar el amplificador a los altavoces?



▲ FIGURA 6–45

Solución Los altavoces están conectados en paralelo a la salida del amplificador, por lo que el voltaje a través de cada altavoz es el mismo. La potencia máxima suministrada a cada altavoz es

$$P_{\text{máx}} = \frac{V^2_{\text{máx}}}{R} = \frac{(15\text{ V})^2}{8\ \Omega} = 28.1\text{ W}$$

La potencia total que el amplificador debe ser capaz de suministrar al sistema de altavoces es dos veces la potencia presente en un altavoz individual porque la potencia total es la suma de las potencias individuales.

$$P_{\text{T(máx)}} = P_{\text{(máx)}} + P_{\text{(máx)}} = 2P_{\text{(máx)}} = 2(28.1\text{ W}) = \mathbf{56.2\text{ W}}$$

Problema relacionado Si el amplificador puede producir un máximo de 18 V, ¿cuál es la potencia máxima total suministrada a los altavoces?

*En este caso el voltaje es de corriente alterna; pero la potencia es determinada igualmente con voltaje de ca que con voltaje de cd, como se verá más adelante.

REPASO DE LA SECCIÓN 6-8

1. **Si se conoce la potencia presente en cada resistor de un circuito en paralelo, ¿cómo se determina la potencia total?**
2. **Los resistores presentes en un circuito en paralelo disipan las siguientes potencias: 238 mW, 512 mW, 109 mW, y 876 mW. ¿Cuál es la potencia total en el circuito?**
3. **Un circuito tiene un resistor de 1.0 kΩ, otro de 2.7 kΩ, y uno más de 3.9 kΩ en paralelo. A este circuito en paralelo entra una corriente total de 1 A. ¿Cuál es la potencia total?**

6–9 APLICACIONES DE CIRCUITOS EN PARALELO

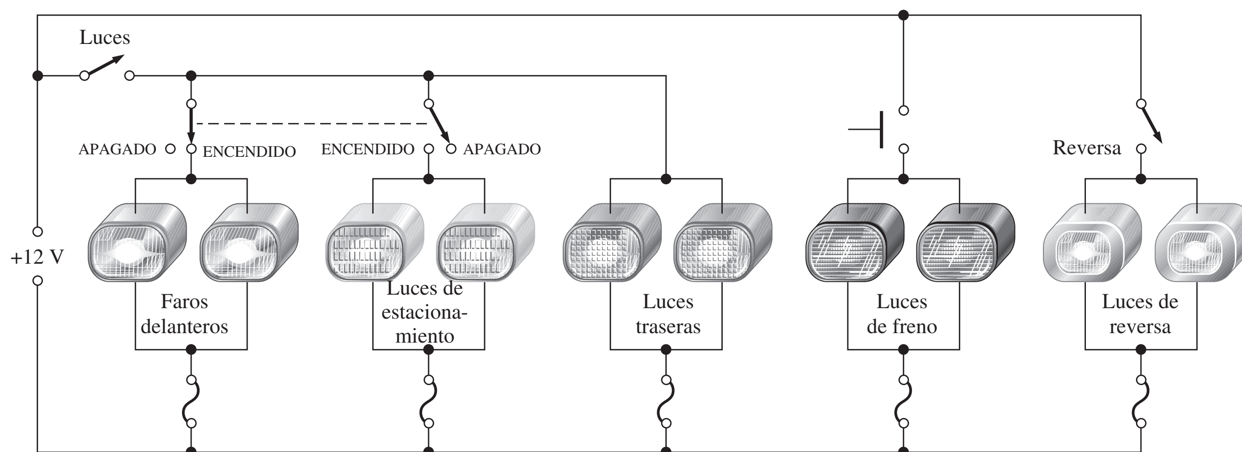
En alguna forma, los circuitos en paralelo se encuentran en casi todo sistema electrónico. En muchas de estas aplicaciones, la relación de componentes en paralelo puede no resultar evidente sino hasta haber cubierto algunos temas avanzados que más adelante se estudiarán. Por el momento, se examinarán algunos ejemplos de aplicaciones comunes y conocidas de circuitos en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir algunas aplicaciones básicas de los circuitos en paralelo**
  - Analizar el sistema de iluminación de los automóviles
  - Analizar la instalación eléctrica residencial
  - Explicar básicamente cómo funciona un amperímetro de múltiples intervalos

Automotriz

Una ventaja de un circuito en paralelo sobre un circuito en serie es que, cuando una rama se abre, las otras ramas no se ven afectadas. Por ejemplo, la figura 6-46 muestra un diagrama simplificado de un sistema de iluminación automotriz. Cuando un faro delantero se apaga, no provoca que la demás luces se apaguen porque todas están en paralelo.



▲ **FIGURA 6–46**

Diagrama simplificado del sistema de luces exteriores de un automóvil.

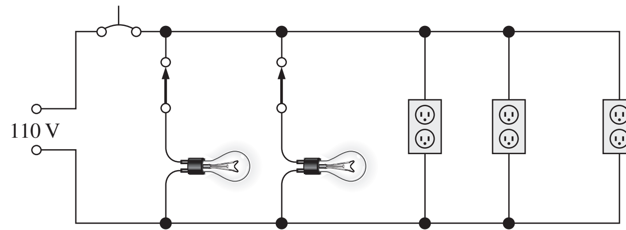
Observe que las luces de frenado se encienden independientemente de los faros delanteros y las luces traseras. Se encienden sólo cuando el conductor cierra el interruptor de la luz de frenado al pisar el pedal del freno. Cuando el interruptor de las luces se cierra, tanto los faros delanteros como las luces traseras se encienden. Cuando los faros delanteros se encienden, las luces de estacionamiento se apagan y viceversa. Si cualquiera de los focos se daña, se abren pero seguirá habiendo corriente en cada una de las demás luces. Las luces de reversa se encienden cuando se mete la reversa.

Residenciales

Otro uso común de circuitos en paralelo se encuentra en los sistemas eléctricos residenciales. Todas las luces y los aparatos utilizados en una casa están alambrados en paralelo. La figura 6-47 muestra el alambrado eléctrico típico de una habitación con dos luces controladas por interruptor y tres tomas de corriente de pared en paralelo.

Amperímetros analógicos

Se utilizan circuitos en paralelo en el amperímetro o el miliamperímetro analógico (tipo manecilla). Aunque los medidores analógicos ya no son tan comunes como alguna vez lo fueron, aún se utilizan como medidores e indicadores en paneles de tableros en ciertas aplicaciones y todavía es-

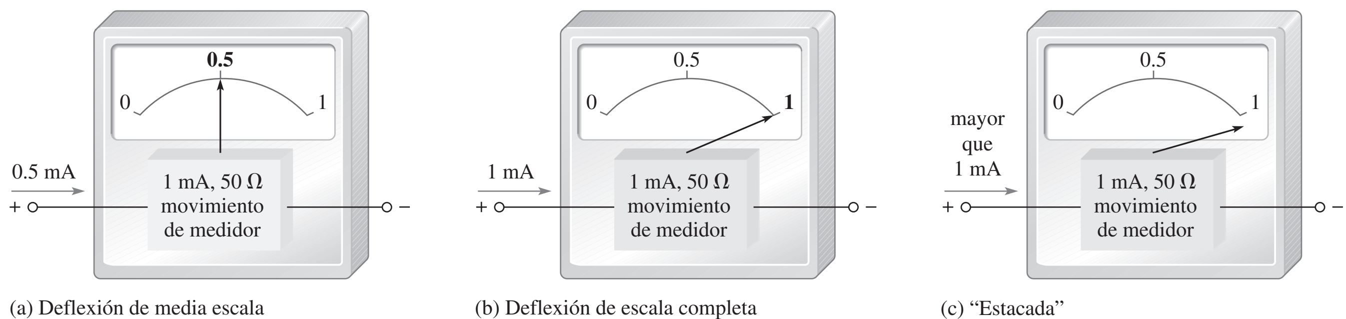


◀ **FIGURA 6–47**

Ejemplo de circuitos en paralelo en una instalación eléctrica residencial.

tán disponibles en el mercado multímetros analógicos. Los circuitos en paralelo constituyen una parte importante de la operación de un amperímetro analógico porque permiten seleccionar varios intervalos para medir muchos valores de corriente distintos.

En un amperímetro, el mecanismo que permite moverse a la manecilla en proporción a la corriente se denomina *movimiento de medidor*, el cual está basado en un principio magnético que más adelante se aprenderá. Por ahora, es suficiente con saber que un movimiento de medidor dado tiene cierta resistencia y una corriente máxima. Esta corriente máxima, llamada *corriente de deflexión de escala completa*, causa que la manecilla llegue hasta el final de la escala. Por ejemplo, cierto movimiento de medidor tiene una resistencia de 50 Ω y una corriente de deflexión de escala completa de 1 mA. Un medidor con este movimiento particular puede medir corrientes de 1 mA o menos, como se muestra en las figuras 6-48(a) y (b). Las corrientes de más de 1 mA causarán que la manecilla se "desplace" (o detenga) un poco más allá de la marca de escala completa, como indica la parte (c), lo cual puede dañar el medidor.

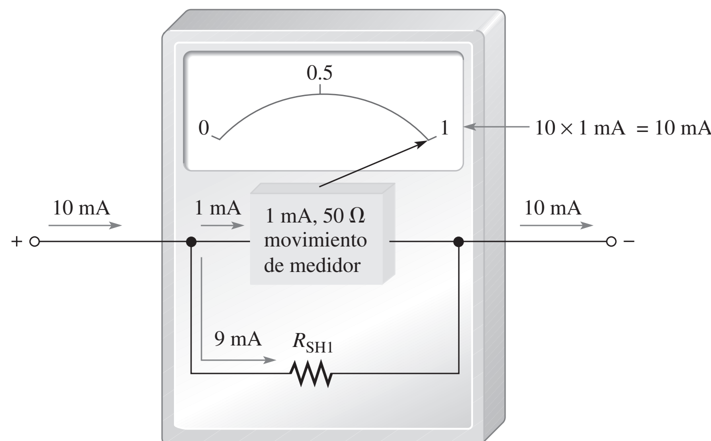


(a) Deflexión de media escala (b) Deflexión de escala completa (c) "Estacada"

▲ **FIGURA 6–48**

Amperímetro analógico de 1 mA.

La figura 6-49 muestra un amperímetro simple con un resistor en paralelo con el movimiento de medidor de 1 mA; este resistor se llama *resistor en derivación*. Su propósito es desviar una parte de la corriente alrededor del movimiento de medidor para ampliar el intervalo de corriente



◀ **FIGURA 6–49**

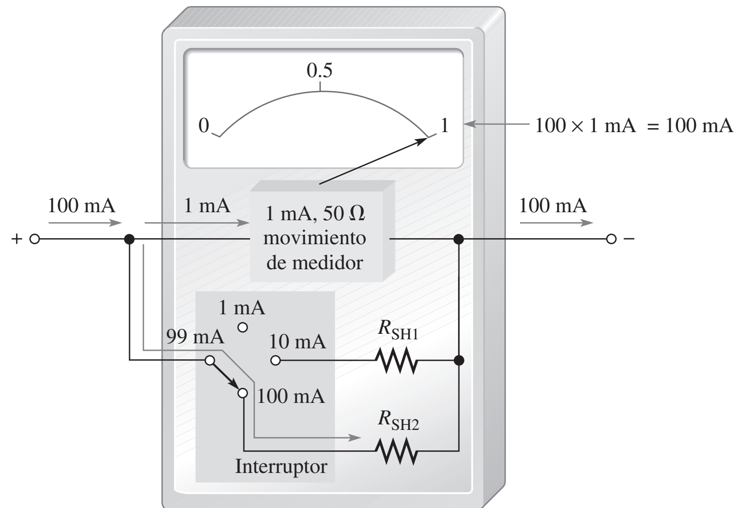
Amperímetro analógico de 10 mA.

que se puede medir. La figura muestra específicamente 9 mA a través del resistor en derivación, y 1 mA a través del movimiento de medidor. Por tanto, se pueden medir hasta 10 mA. Para encontrar el valor de corriente real, simplemente se multiplica por 10 la lectura aparecida en la escala.

Un amperímetro de intervalos múltiples dispone de un interruptor que permite seleccionar varios ajustes de corriente de escala completa. En cada posición del interruptor, cierta cantidad de corriente es desviada a través de un resistor en paralelo según como lo determina el valor de resistencia. En el ejemplo, la corriente a través del movimiento de medidor nunca es mayor que 1 mA.

La figura 6-50 ilustra un medidor con tres intervalos: 1 mA, 10 mA, y 100 mA. Cuando el interruptor de intervalo está en la posición de 1 mA, toda la corriente que entra al medidor pasa por el movimiento de medidor. En el ajuste de 10 mA, hasta 9 mA pasan a través de R_{SH1}, y hasta 1 mA a través del movimiento de medidor. En el ajuste de 100 mA, hasta 99 mA pasan por R_{SH2}, y el movimiento de medidor aún puede tener sólo 1 mA para escala completa.

La lectura se interpreta con base en el ajuste del intervalo. Por ejemplo, en la figura 6-50, si se van a medir 50 mA de corriente, la manecilla apunta a la marca de 0.5 en la escala; se debe multiplicar 0.5 por 100 para encontrar el valor de la corriente. En esta situación, 0.5 mA pasan a través del movimiento de medidor (deflexión de media escala) y 49.5 mA pasan por R_{SH2}.



▲ **FIGURA 6–50**

Amperímetro analógico de tres intervalos.

Efecto del amperímetro en un circuito Como ya se sabe, un amperímetro se conecta en serie para medir la corriente en un circuito. Idealmente, el medidor no deberá alterar la corriente que pretende medir. En la práctica, sin embargo, es inevitable que el medidor afecte un poco el circuito porque su resistencia interna está conectada en serie con la resistencia del circuito. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la resistencia interna del medidor es tan pequeña, comparada con la resistencia del circuito, que puede ser ignorada.

Por ejemplo, si el movimiento de medidor es de 50 Ω (R_M) y la corriente de escala completa de 0.1 mA (I_M), la máxima caída de voltaje a través del movimiento de medidor es

$$V_M = I_M R_M = (0.1\text{ mA})(50\ \Omega) = 5\text{ mV}$$

La resistencia en derivación (R_{SH}) para el intervalo de 10 mA, por ejemplo, es

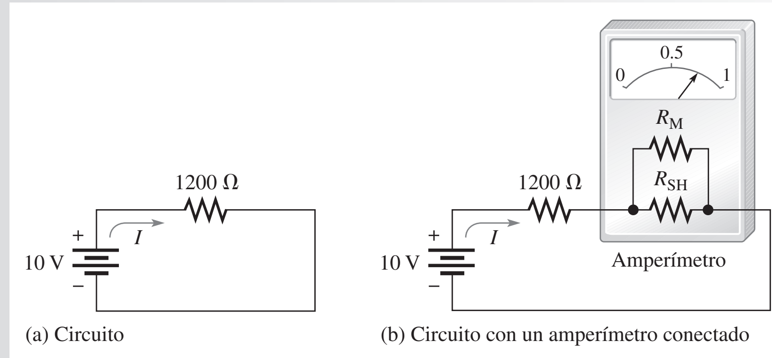
$$R_{SH} = \frac{V_M}{I_{SH}} = \frac{5\text{ mV}}{9.9\text{ mA}} = 0.505\ \Omega$$

Como se puede advertir, la resistencia total del amperímetro en el intervalo de 10 mA es la resistencia del movimiento de medidor en paralelo con la resistencia en derivación.

$$R_{M(tot)} = R_M \| R_{SH} = 50\ \Omega \parallel 0.505\ \Omega = 0.5\ \Omega$$

EJEMPLO 6–20 ¿Cuánto afecta un amperímetro de 10 mA con un movimiento de 50 Ω (RM) y 0.1 mA de escala completa (IM) la corriente que circula en el circuito de la figura 6-51?

▶ **FIGURA 6–51**



Solución En el circuito (sin medidor), la corriente original es

$$I_{orig} = \frac{10\text{ V}}{1200\ \Omega} = 8.3333\text{ mA}$$

El medidor se sitúa en el intervalo de 10 mA para medir esta cantidad particular de corriente. La resistencia del medidor en el intervalo de 10 mA es de 0.5 Ω. Al conectar el medidor en el circuito, su resistencia está en serie con el resistor de 1200 Ω. Por tanto, hay un total de 1200.5 Ω.

En el circuito, la corriente se reduce un poco al insertar el medidor.

$$I_{medida} = \frac{10\text{ V}}{1200.5\ \Omega} = 8.3299\text{ mA}$$

Con la presencia del medidor, la corriente difiere de la corriente original existente en el circuito en sólo **3.4 μA** o **0.04 por ciento**.

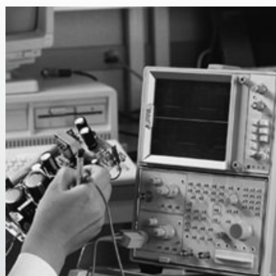
Por consiguiente, el medidor no modifica de modo significativo el valor de la corriente, una situación que, desde luego, es necesaria porque el instrumento de medición no deberá cambiar la cantidad que va ser medida con precisión.

Problema relacionado ¿Cuánto diferirá la corriente medida de la corriente original si la resistencia del circuito mostrado en la figura 6-51 es de 12 kΩ en lugar de 1200 Ω?

REPASO DE LA SECCIÓN 6-9

1. En cuanto al amperímetro mostrado en la figura 6-51, ¿cuál es la resistencia máxima que tendrá el medidor cuando se conecte a un circuito? ¿Cuál es la corriente máxima que puede ser medida con el ajuste?
2. ¿Los resistores en derivación tienen valores de resistencia considerablemente menores o mayores que el valor del movimiento de medidor? ¿Por qué?

6–10 LOCALIZACIÓN DE FALLAS



Recuerde que un circuito abierto es uno en el cual la trayectoria de la corriente se interrumpe y no hay corriente. En esta sección se examina lo que sucede cuando se abre una rama de un circuito en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

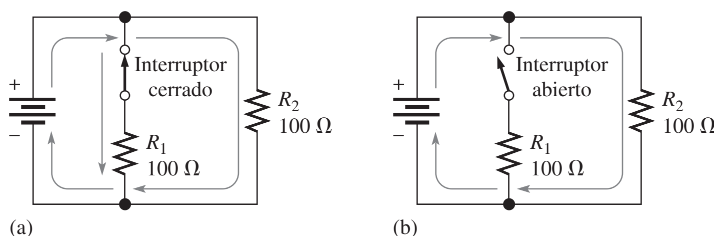
- **Localizar fallas en circuitos en paralelo**
  - Revisar en busca de una abertura en un circuito

Ramas abiertas

Si se conecta un interruptor en una rama de un circuito en paralelo, como se muestra en la figura 6-52, el interruptor puede abrir o cerrar una trayectoria. Cuando el interruptor se cierra, como en la figura 6-52(a), R_1 y R_2 están en paralelo. La resistencia total es de 50 Ω (dos resistores de 100 Ω en paralelo). La corriente pasa por ambos resistores. Si el interruptor se abre, como en la figura 6-52(b), R_1 se retira efectivamente del circuito, y la resistencia total es de 100 Ω. La corriente ahora sólo pasa por R_2. En general,

Cuando una rama en paralelo se abre, la resistencia total se incrementa, la corriente total disminuye, y la misma corriente continúa fluyendo por cada una de las trayectorias en paralelo restantes.

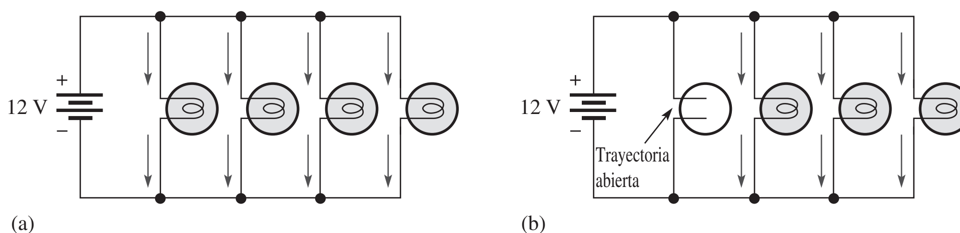
La disminución de la corriente total es igual a la cantidad de corriente que previamente circulaba por la rama abierta. Las demás corrientes de rama no cambian.



▶ **FIGURA 6–52**

Cuando un interruptor se abre, la corriente total disminuye y la corriente a través de R_2 no cambia.

Considere el circuito de lámparas mostrado en la figura 6-53. Hay cuatro focos dispuestos en paralelo con una fuente de 12 V. En la parte (a) existe corriente a través de cada foco. Suponga ahora que uno de los focos se funde, lo cual crea una trayectoria abierta como indica la figura 6-53(b). Esta luz se apagará porque no hay corriente a través de la trayectoria abierta. Observe, sin embargo, que la corriente continúa fluyendo por los demás focos en paralelo, y



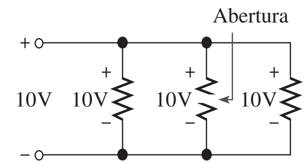
▲ **FIGURA 6–53**

Cuando una lámpara se abre, la corriente total disminuye y otras corrientes de rama no cambian.

siguen brillando. La rama abierta no cambia el voltaje de las ramas en paralelo, éste permanece en 12 V y la corriente a través de cada rama no cambia.

Se advierte que, en los sistemas de iluminación, el circuito en paralelo tiene una ventaja sobre el circuito en serie porque si uno o más focos en paralelo se funden, todos los demás permanecerán encendidos. En un circuito en serie, cuando se apaga un foco, todos los demás focos también se apagan porque la trayectoria de la corriente se interrumpe por completo.

Cuando en un circuito en paralelo se abre un resistor, el resistor abierto no puede ser localizado midiendo el voltaje a través de las ramas porque existe el mismo voltaje en todas las ramas. Por tanto, con la simple medición del voltaje, no hay forma de establecer qué resistor está abierto. Los resistores en buen estado siempre tendrán el mismo voltaje que el resistor abierto, como ilustra la figura 6-54 (observe que el resistor intermedio está abierto).



▲ **FIGURA 6–54**

Las ramas en paralelo (abiertas o no) tienen el mismo voltaje.

Si una inspección visual no revela el resistor abierto, habrá que localizarlo utilizando mediciones de corriente. En la práctica, la medición de corriente es más difícil que la de voltaje porque hay que insertar el amperímetro en serie para medirla. Por tanto, en la tarjeta de circuito impreso, un conductor o una conexión deben ser cortados o desconectados, o hay que desprender un extremo del componente de la tarjeta de circuito para conectar el amperímetro en serie. Este procedimiento, por supuesto, no se requiere cuando se realizan mediciones de voltaje porque los conectores del medidor simplemente se conectan de un lado a otro de un componente.

Localización de una rama abierta utilizando medición de corriente

En un circuito en paralelo con una supuesta rama abierta, se puede medir la corriente total para localizar la abertura. *Cuando un resistor en paralelo se abre, la corriente total I_T siempre es menor que su valor normal*. Una vez conocidos I_T y el voltaje a través de las ramas, unos cuantos cálculos determinarán el resistor abierto cuando todos los resistores son de diferentes valores de resistencia.

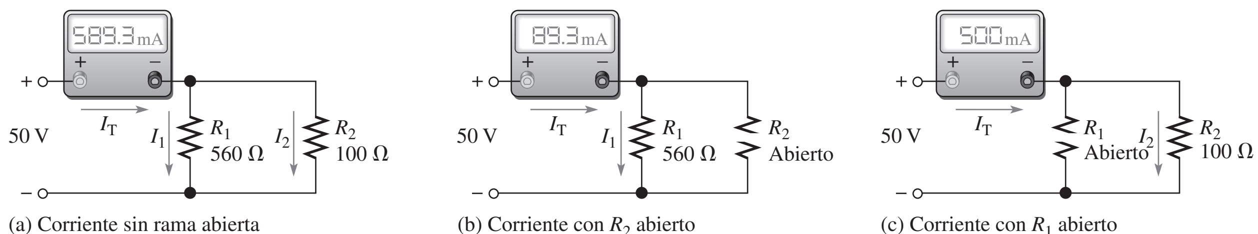
Considere el circuito de dos ramas mostrado en la figura 6-55(a). Si uno de los resistores se abre, la corriente total será igual a la corriente presente en el resistor en buen estado. La ley de Ohm indica de inmediato cuál deberá ser la corriente en cada resistor.

$$I_1 = \frac{50\text{ V}}{560\ \Omega} = 89.3\text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{50\text{ V}}{100\ \Omega} = 500\text{ mA}$$

$$I_T = I_1 + I_2 = 589.3\text{ mA}$$

Si R_2 se abre, la corriente total es de 89.3 mA, como indica la figura 6-55(b). Si R_1 se abre, la corriente total es de 500 mA, como indica la figura 6-55(c).

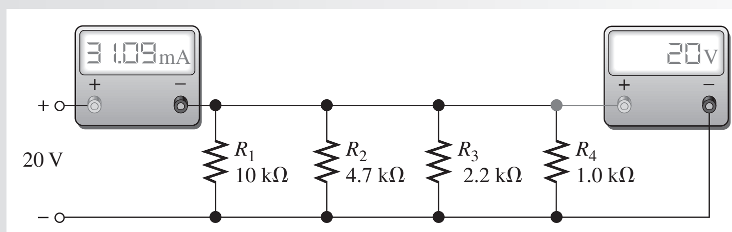


▲ **FIGURA 6–55**

Localización de una trayectoria abierta mediante medición de corriente.

Este procedimiento puede ser ampliado a cualquier cantidad de ramas con resistencias desiguales. Si todas las resistencias en paralelo son iguales, la corriente debe ser verificada en cada rama hasta que se encuentre una rama sin corriente. Ésta es el resistor abierto.

EJEMPLO 6–21 En la figura 6-56, la corriente total es de 31.09 mA, y el voltaje a través de las ramas en paralelo es de 20 V. ¿Hay un resistor abierto, y, si lo hay, cuál es?



▲ FIGURA 6–56

Solución Calcule la corriente en cada rama.

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{20\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 2\text{ mA}$$
$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{20\text{ V}}{4.7\text{ k}\Omega} = 4.26\text{ mA}$$
$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{20\text{ V}}{2.2\text{ k}\Omega} = 9.09\text{ mA}$$
$$I_4 = \frac{V}{R_4} = \frac{20\text{ V}}{1.0\text{ k}\Omega} = 20\text{ mA}$$

La corriente total deberá ser

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 2\text{ mA} + 4.26\text{ mA} + 9.09\text{ mA} + 20\text{ mA} = 35.35\text{ mA}$$

La corriente medida real es de 31.09 mA, como se aseveró, la cual es 4.26 mA menor que lo normal, ello indica que la rama que transporta 4.26 mA está abierta. Por tanto, **R_2 debe de estar abierto**.

Problema relacionado ¿Cuál es la corriente total medida en la figura 6-56 si R_4, y no R_2, está abierto?

Localización de una rama abierta utilizando medición de resistencia

Si el circuito en paralelo a ser revisado puede desconectarse de su fuente de voltaje y de cualquier otro circuito al cual pueda estar conectado, es posible utilizar una medición de la resistencia total para localizar una rama abierta.

Recuerde que la conductancia, G, es el recíproco de la resistencia ($1/R$), y su unidad es el siemens (S) o mho. La conductancia total de un circuito en paralelo es la suma de las conductancias de todos los resistores,

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$$

Para localizar una rama abierta, se realizan los siguientes pasos:

1. Calcular cuál deberá ser la conductancia total, para ello se utilizan los valores de resistor individuales,

$$G_{T(calculada)} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

2. Medir la resistencia total con un ohmmetro y calcular la conductancia total medida

$$G_{T(medida)} = \frac{1}{R_{T(medida)}}$$

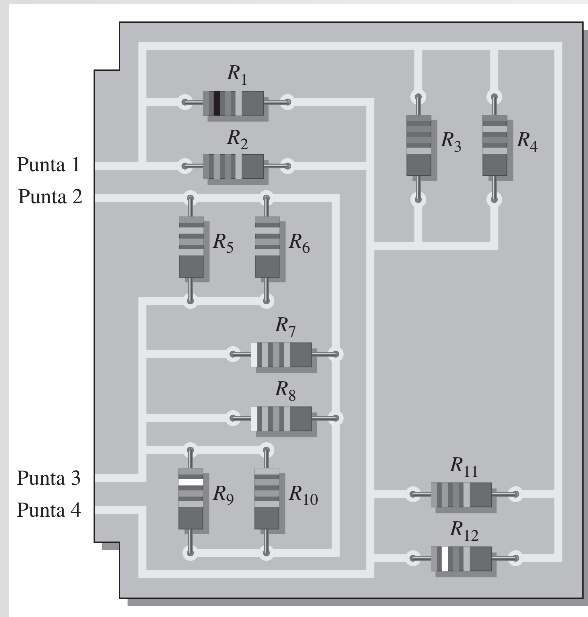
3. Restar la conductancia total medida (Paso 2) de la conductancia total calculada (Paso 1). El resultado es la conductancia de la rama abierta y la resistencia se obtiene tomando su recíproco ($R = 1/G$).

$$R_{\text{abierta}} = \frac{1}{G_{\text{T(calculada)}} - G_{\text{T(medida)}}}$$

Ecuación 6–10

EJEMPLO 6–22 Revise la tarjeta de circuito impreso mostrada en la figura 6-57 en cuanto a ramas abiertas.

► **FIGURA 6–57**



Solución En la tarjeta hay dos circuitos en paralelo distintos. El circuito entre las puntas 1 y 4 se revisa como sigue (asumiendo que uno de los resistores está abierto).

1. Calcule cuál deberá ser la conductancia utilizando los valores de resistor individuales.

$$G_{\text{T(calculada)}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}}$$

$$= \frac{1}{1.0\text{ k}\Omega} + \frac{1}{1.8\text{ k}\Omega} + \frac{1}{2.2\text{ k}\Omega} + \frac{1}{2.7\text{ k}\Omega} + \frac{1}{3.3\text{ k}\Omega} + \frac{1}{3.9\text{ k}\Omega} = 2.94\text{ mS}$$

2. Mida la resistencia total con un ohmmetro y calcule la conductancia total medida. Asuma que su ohmmetro mide 402 Ω.

$$G_{\text{T(medida)}} = \frac{1}{402\ \Omega} = 2.49\text{ mS}$$

3. Reste la conductancia total medida (Paso 2) de la conductancia total calculada (Paso 1). El resultado es la conductancia de la rama abierta, y la resistencia se obtiene tomando el recíproco.

$$G_{\text{abierta}} = G_{\text{T(calculada)}} - G_{\text{T(medida)}} = 2.94\text{ mS} - 2.49\text{ mS} = 0.45\text{ mS}$$

$$R_{\text{abierta}} = \frac{1}{G_{\text{abierta}}} = \frac{1}{0.45\text{ mS}} = 2.2\text{ k}\Omega$$

El resistor R_3 está abierto y debe ser reemplazado.

Problema relacionado Su ohmmetro indica 9.6 kΩ entre las puntas 2 y 3 de la tarjeta de circuito impreso mostrada en la figura 6-57. Determine si esto es correcto y, si no, cuál resistor está abierto.

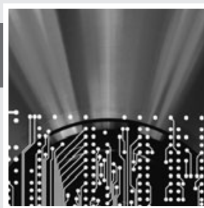
Ramas en cortocircuito

Cuando en un circuito en paralelo una rama entra en cortocircuito, la corriente se incrementa a un valor excesivo, lo cual provoca que se funda un fusible o se active un cortocircuito. Esto dificulta el problema de localización de fallas porque es difícil aislar la rama que está en cortocircuito.

Un generador de pulsos y un trazador de corriente son herramientas utilizadas a menudo para localizar cortos en un circuito. Su uso no está limitado a circuitos digitales y son efectivos en cualquier tipo de circuito. El generador de pulsos es una herramienta en forma de bolígrafo que aplica pulsos a un punto seleccionado en un circuito, lo cual provoca que fluyan pulsos de corriente a través de la trayectoria en cortocircuito. El trazador de corriente es también una herramienta en forma de bolígrafo que detecta pulsos de corriente. Al seguir la corriente con el trazador, la trayectoria de la corriente puede ser identificada.

REPASO DE LA SECCIÓN 6-10

1. **Si una rama en paralelo se abre, ¿qué cambios de voltaje pueden ser detectados en el voltaje del circuito y de las corrientes, suponiendo que el circuito en paralelo está a través de una fuente de voltaje constante?**
2. **¿Qué le sucede a la resistencia total si una rama se abre?**
3. **Si se conectan varios focos en paralelo y uno de los focos se abre (funde), ¿los otros seguirán encendidos?**
4. **Por cada una de las ramas de un circuito en paralelo circulan 100 mA de corriente. Si una rama se abre, ¿cuál es la corriente en cada una de las ramas restantes?**
5. **Un circuito de tres ramas normalmente tiene las siguientes corrientes de rama: 100 mA, 250 mA y 120 mA. Si la corriente total es de 350 mA, ¿cuál rama está abierta?**



Una aplicación de circuito

En esta aplicación se modifica una fuente de potencia de cd agregando un amperímetro de 3 intervalos para indicar la corriente suministrada a la carga. Como ya se aprendió, las resistencias en paralelo pueden ser utilizadas para ampliar el intervalo de un amperímetro. Estos resistores en paralelo, llamados de *desvío* o de *derivaciones*, desvían la corriente alrededor del movimiento de medidor, permitiendo que éste mida efectivamente corrientes más altas que la corriente máxima para la cual se diseñó el movimiento de medidor.

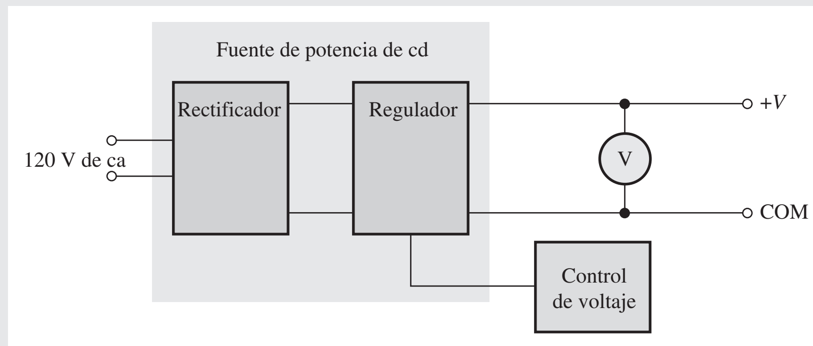
La fuente de potencia

En la figura 6-58 se muestra una fuente de potencia montada en un módulo o panel. El voltímetro indica el voltaje de salida, el



▶ **FIGURA 6–58**

Vista del panel frontal de una fuente de potencia montada en un soporte.



▲ **FIGURA 6–59**

Diagrama de bloques básico de la fuente de potencia de cd.

cual puede ser ajustado desde 0 hasta 10 V utilizando el control de voltaje. La fuente de potencia es capaz de suministrar hasta 2 A a una carga. En la figura 6-59 se muestra un diagrama de bloques básico de la fuente de potencia. Esta fuente consta de un circuito rectificador que convierte el voltaje de ca de la toma de corriente de pared en voltaje de cd, y de un circuito regulador que mantiene el voltaje de salida a un valor constante.

Se requiere que la fuente de potencia sea modificada mediante la adición de un amperímetro con tres intervalos de corriente seleccionados por un interruptor de 25 mA, 250 mA y 2.5 A. Para lograr esto, se utilizan dos resistencias en derivación y cada una puede ser cambiada a una conexión en paralelo con el movimiento de medidor. Este método funciona de modo muy aceptable en tanto los valores requeridos de los resistores en derivación no sean demasiado pequeños. Sin embargo, con valores de resistencia en derivación muy bajos se presentan problemas, y enseguida se verá por qué.

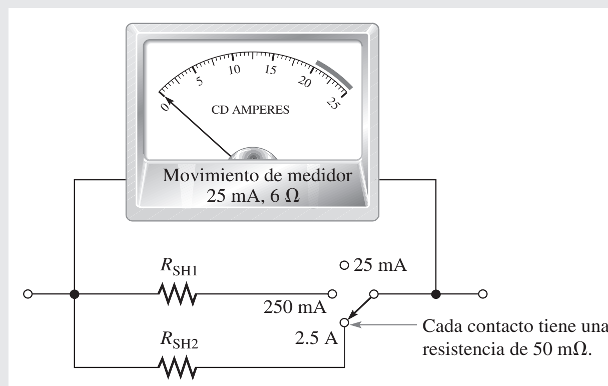
El circuito en derivación

Se elige un amperímetro con deflexión de escala completa de 25 mA y resistencia de 6 Ω*. Se pueden agregar dos resistores en derivación para deflexiones de escala completa, uno para 250 mA y otro para 2.5 A. El movimiento de medidor interno proporciona el intervalo de 25 mA. Éste se muestra en la figura 6-60. La selección de intervalos es proporcionada por un interruptor rotatorio de 1 polo y 3 posiciones con resistencia de contacto de 50 mΩ. La resistencia de contacto de los interruptores puede ser desde menos de 20 mΩ hasta aproximadamente 100 mΩ. La resistencia de contacto de un interruptor dado puede variar con la temperatura, la corriente y el uso y, por consiguiente, no se puede confiar en ella para que permanezca dentro de una tolerancia razonable del valor especificado. Asimismo, el interruptor es del tipo realizar antes de interrumpir, lo cual significa que el contacto con la posición previa no se interrumpe sino hasta realizar el contacto con la nueva posición.

El valor de la resistencia en derivación en el intervalo de 2.5 A se determina como sigue, donde el voltaje a través del movimiento de medidor es

$$V_M = I_M R_M = (25\ \text{mA})(6\ \Omega) = 150\ \text{mV}$$

La corriente que circula por el resistor en derivación con deflexión de escala completa es



▲ **FIGURA 6–60**

Amperímetro modificado para que permita tres intervalos.

***Vea el miliamperímetro Simpson modelo 1227 en www.simpsonelectric.com.**

$$I_{SH2} = I_{ESCALA\ COMPLETA} - I_M = 2.5\ A - 25\ mA = 2.475\ A$$

La resistencia total en derivación es

$$R_{SH2(tot)} = \frac{V_M}{I_{SH2}} = \frac{150\ mV}{2.475\ A} = 60.6\ m\Omega$$

En general, en el mercado están disponibles resistores de precisión con valores desde 1 mΩ a 10 Ω o más grandes.

En la figura 6-60, observe que la resistencia, $R_{CONTACTO}$, del interruptor aparece en serie con R_{SH2}. Como la resistencia total en derivación debe ser de 60.6 mΩ, el valor del resistor en derivación R_{SH2} es

$$R_{SH2} = R_{SH2(tot)} - R_{CONT} = 60.6\ m\Omega - 50\ m\Omega = 10.6\ m\Omega$$

Aunque este valor, o uno próximo a él, puede estar disponible, en este caso, el problema es que la resistencia de contacto del interruptor es casi dos veces la de R_{SH2}, y cualquier variación en ésta crearía una imprecisión significativa en el medidor. Como puede advertirse, este método no es aceptable para estos requerimientos en particular.

Otro método

En la figura 6-61 se muestra una variación del circuito con resistencia en derivación estándar. El resistor en derivación, R_{SH}, se conecta en paralelo para los dos ajustes de intervalo de corriente más altos, y se desconecta para el ajuste de 25 mA con un interruptor de 3 posiciones y 2 polos. Este circuito evita depender de la resistencia de contacto del interruptor, al usar valores de resistor lo suficientemente grandes como para volverla insignificante. Las desventajas de este circuito medidor son que requiere de un interruptor más complejo, y las caídas de voltaje desde la entrada hasta la salida son más grandes que en el circuito en derivación analizado previamente.

Para el intervalo de 250 mA, la corriente que circula por el movimiento de medidor con deflexión de escala completa es de 25 mA. El voltaje a través del movimiento de medidor es de 150 mV.

$$I_{SH} = 250\ mA - 25\ mA = 225\ mA$$

$$R_{SH} = \frac{150\ mV}{225\ mA} = 0.67\ \Omega = 670\ m\Omega$$

Este valor de R_{SH} es más de treinta veces la resistencia de contacto esperada del interruptor de 20 mΩ, por lo que el efecto de la resistencia de contacto se reduce al mínimo.

Para el intervalo de 2.5 A, la corriente que circula por el movimiento de medidor con deflexión de escala completa sigue siendo de 25 mA. Esta es también la corriente que pasa por R_1.

$$I_{SH} = 2.5\ A - 25\ mA = 2.475\ A$$

El voltaje a través del circuito del medidor de *A* a *B* es

$$V_{AB} = I_{SH}R_{SH} = (2.475\ A)(670\ m\Omega) = 1.66\ V$$

Al aplicar la ley del voltaje de Kirchhoff y la ley de Ohm para determinar R_1

$$V_{R1} + V_M = V_{AB}$$

$$V_{R1} = V_{AB} - V_M = 1.66\ V - 150\ mV = 1.51\ V$$

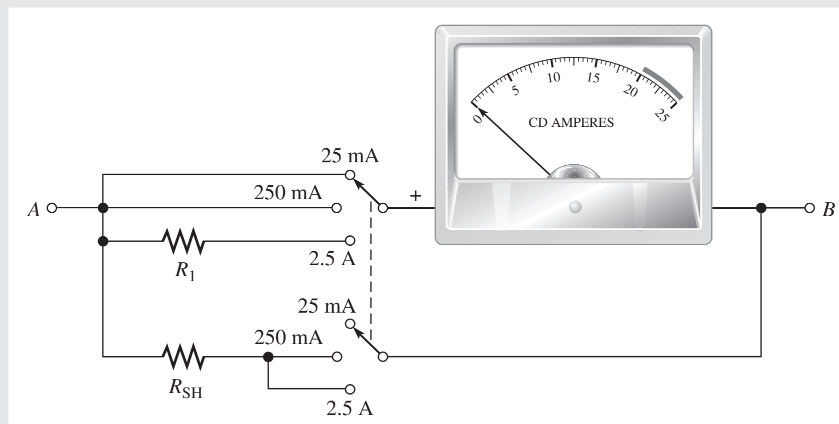
$$R_1 = \frac{V_{R1}}{I_M} = \frac{1.51\ V}{25\ mA} = 60.4\ \Omega$$

Este valor es mucho más grande que la resistencia de contacto del interruptor.

- ◆ Determine la potencia máxima disipada por R_{SH} en la figura 6-61 para cada ajuste de intervalo.
- ◆ ¿Cuánto voltaje existe de *A* a *B* en la figura 6-61 cuando el interruptor se ajusta al intervalo de 2.5 A y la corriente es de 1 A?
- ◆ El medidor indica 250 mA. ¿En cuánto cambia el voltaje a través del circuito medidor de *A* a *B* cuando el interruptor se mueve de la posición de 250 mA a la posición de 2.5 A?
- ◆ Suponga que la resistencia del movimiento de medidor es de 4 Ω en lugar de 6 Ω. Especifique cualquier cambio necesario en el circuito de la figura 6-61.

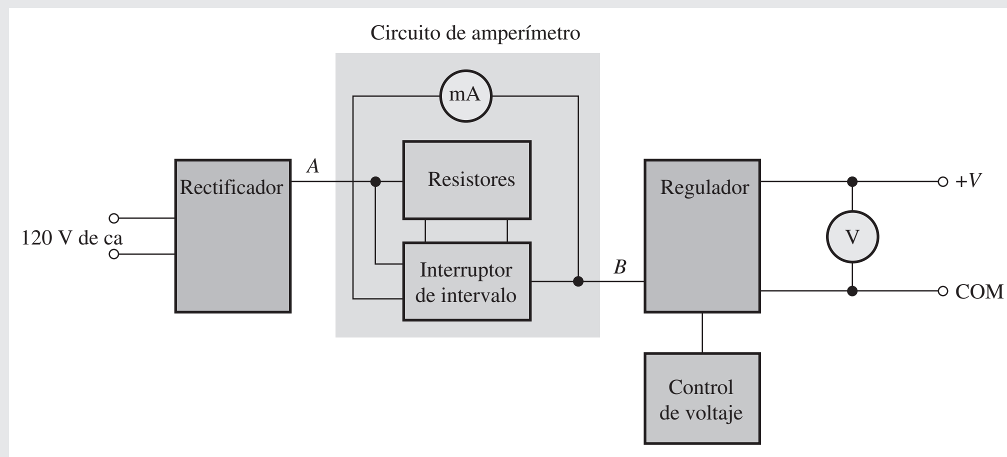
Implementación de la modificación de la fuente de potencia

Una vez que se obtienen los valores apropiados, los resistores se colocan en una tarjeta que luego se monta en la fuente de potencia. Los resistores y el interruptor de intervalos se conectan a la fuente de potencia como indica la figura 6-62. El circuito del amperímetro se conecta entre el circuito rectificador de la fuente de potencia y el circuito regulador para reducir el impacto de la caída de voltaje a través del circuito medidor en el voltaje de salida. El regulador mantiene, dentro de ciertos límites, un voltaje de salida de cd constante aun cuando su voltaje de entrada que pasa por el circuito medidor puede cambiar.



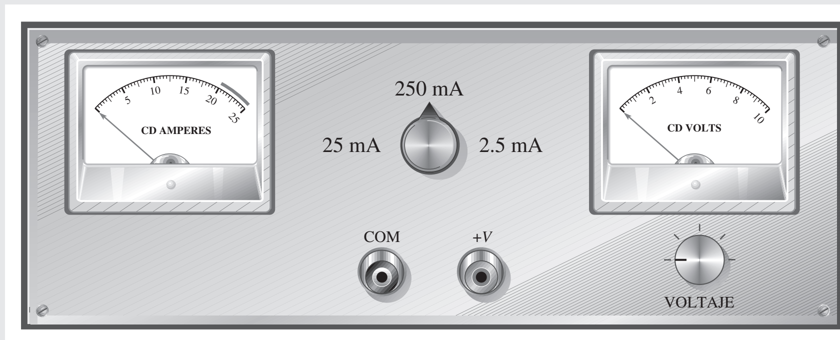
▶ **FIGURA 6–61**

Circuito medidor rediseñado para eliminar o reducir al mínimo el efecto de la resistencia de contacto del interruptor. Éste es del tipo rotatorio de realizar antes de interrumpir, tiene 2 polos y 3 posiciones.



▲ **FIGURA 6–62**

Diagrama de bloques de una fuente de potencia de cd con miliamperímetro de tres intervalos.



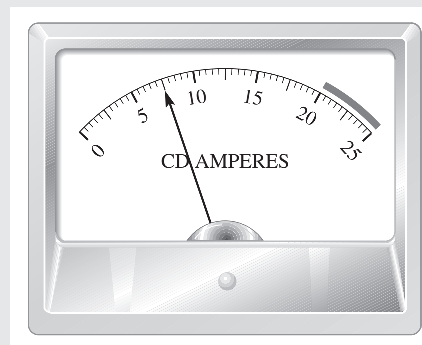
◀ **FIGURA 6–63**

La fuente de potencia con la adición del miliamperímetro y el interruptor selector de intervalos.

La figura 6-63 muestra el tablero frontal de la fuente de potencia con el interruptor de intervalo rotatorio y el miliamperímetro instalados. La parte roja de la escala indica exceso de corriente en el intervalo de 2.5 A, puesto que la fuente de potencia tiene una corriente máxima de 2 A para realizar una operación segura.

Repaso

1. Cuando el medidor se pone en el intervalo de 250 mA, ¿por cuál resistencia circula más corriente?
2. Determine la resistencia total de *A* a *B* del circuito medidor mostrado en la figura 6-61 para cada uno de los tres intervalos de corriente.
3. Explique por qué se utilizó el circuito de la figura 6-61 en lugar del de la figura 6-60.
4. Si la manecilla está en el 15 y el interruptor de intervalo está en 250 mA, ¿cuál es la corriente?
5. ¿Cuánta corriente indica el amperímetro de la figura 6-64 para cada una de las posiciones del interruptor de intervalo mostrado en la figura 6-61?



◀ **FIGURA 6–64**

RESUMEN

- Los resistores en paralelo se conectan entre dos puntos (nodos).
- Una combinación en paralelo tiene más de una trayectoria para la corriente.
- La resistencia total en paralelo es menor que el resistor de valor más bajo.
- Los voltajes a través de todas las ramas de un circuito en paralelo son los mismos.
- La fuentes de corriente en paralelo se suman algebraicamente.
- Ley de las corrientes de Kirchhoff: La suma de las corrientes que entran a un nodo (corriente total de entrada) es igual a las corrientes que salen del nodo (corriente total de salida).
- La suma algebraica de todas las corrientes que entran a, y salen de, una nodo es igual a cero.
- Un circuito en paralelo es un divisor de corriente, llamado así porque la corriente total que entra a la unión de ramas en paralelo se divide en cada una de las ramas.
- Si todas las ramas de un circuito en paralelo tienen igual resistencia, las corrientes que pasan por todas las ramas son iguales.
- La potencia total presente en un circuito resistivo en paralelo es la suma de todas las potencias individuales de los resistores que integran el circuito en paralelo.
- La potencia total de un circuito en paralelo puede ser calculada con las fórmulas de potencia utilizando valores de corriente total, resistencia total, o voltaje total.
- Si una de las ramas de un circuito en paralelo se abre, la resistencia total se incrementa y, por consiguiente, la corriente total disminuye.
- Si una rama de un circuito en paralelo se abre, la corriente que circula por las ramas restantes no cambia.

TÉRMINOS CLAVE

Estos términos clave también se encuentran en el glosario incluido al final del libro.

Divisor de corriente Circuito en paralelo en el cual las corrientes se dividen de modo inversamente proporcional a las resistencias de las ramas en paralelo.

Ley de la corriente de Kirchhoff Una ley de circuito que expresa que la corriente total entrante a un nodo es igual a la corriente total saliente del nodo. De forma equivalente, la suma algebraica de todas las corrientes que entran a, y salen de, un nodo es cero.

Nodo En un circuito, punto en el cual dos o más componentes están conectados; también es conocido como *unión*.

Paralelo La relación en circuitos eléctricos en los cuales dos o más trayectorias para corriente están conectadas entre dos nodos distintos.

Rama Trayectoria para la corriente que circula en un circuito en paralelo.

FÓRMULAS

6–1 $$I_{\text{ENTRADA}(1)} + I_{\text{ENTRADA}(2)} + \cdots + I_{\text{ENTRADA}(n)} = I_{\text{SALIDA}(1)} + I_{\text{SALIDA}(2)} + \cdots + I_{\text{SALIDA}(m)}$$ Ley de la corriente de Kirchhoff

6–2 $$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{R_n}\right)}$$ Resistencia total en paralelo

6–3 $$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$ Caso especial de dos resistores en paralelo

6–4 $$R_T = \frac{R}{n}$$ Caso especial de *n* resistores de igual valor en paralelo

6–5 $$R_x = \frac{R_A R_T}{R_A - R_T}$$ Resistor en paralelo desconocido

6–6 $I_x = \left(\frac{R_T}{R_x}\right)I_T$ Fórmula general del divisor de corriente

6–7 $I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)I_T$ Fórmula del divisor de corriente de dos ramas

6–8 $I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)I_T$ Fórmula del divisor de corriente de dos ramas

6–9 $P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$ Potencia total

6–10 $R_{abierta} = \frac{1}{G_{T(calculada)} - G_{T(medida)}}$ Resistencia de rama abierta

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. En un circuito en paralelo, cada resistor tiene
(a) la misma corriente **(b)** el mismo voltaje
(c) la misma potencia **(d)** todo lo anterior

2. Cuando un resistor de 1.2 kΩ y otro de 100 Ω se conectan en paralelo, la resistencia total es
(a) mayor que 1.2 kΩ
(b) mayor que 100 Ω pero menor que 1.2 kΩ
(c) menor que 100 Ω pero mayor que 90 Ω
(d) menor que 90 Ω

3. Un resistor de 330 Ω, otro de 270 Ω, y uno más de 68 Ω están en paralelo. La resistencia total es aproximadamente de
(a) 668 Ω **(b)** 47 Ω **(c)** 68 Ω **(d)** 22 Ω

4. Ocho resistores están en paralelo. Los de valor más bajo son de 1.0 kΩ. La resistencia total es
(a) menor que 8 kΩ **(b)** mayor que 1.0 kΩ
(c) menor que 1.0 kΩ **(d)** menor que 500 Ω

5. Cuando se conecta un resistor adicional de un lado a otro de un circuito paralelo existente, la resistencia total
(a) disminuye **(b)** aumenta
(c) no cambia **(d)** se incrementa en el valor del resistor agregado

6. Si uno de los resistores de un circuito en paralelo se elimina, la resistencia total
(a) disminuye en el valor del resistor eliminado **(b)** no cambia
(c) aumenta **(d)** se duplica

7. Dos corrientes entran a una unión, una corriente es de 500 mA y otra de 300 mA. La corriente total que sale de la unión es
(a) de 200 mA **(b)** desconocida **(c)** de 800 mA **(d)** la más grande de las dos

8. Los siguientes resistores están en paralelo entre las terminales de una fuente de voltaje: 390 Ω, 560 Ω, y 820 Ω. El resistor con menos corriente es
(a) 390 Ω **(b)** 560 Ω
(c) 820 Ω **(d)** imposible determinarlo sin que se conozca el voltaje

9. Una reducción repentina de la corriente total que entra a un circuito en paralelo puede indicar
(a) un corto **(b)** un resistor abierto
(c) una caída del voltaje de fuente **(d)** o (b) o (c)

10. Por cada una de las ramas de un circuito en paralelo de cuatro ramas circula corriente de 10 mA. Si una de las ramas se abre, la corriente en cada una de las otras tres es de
(a) 13.3 mA **(b)** 10 mA **(c)** 0 A **(d)** 30 mA

11. En cierto circuito en paralelo de tres ramas, R_1 tiene 10 mA a través de él, R_2 tiene 15 mA, y R_3 20 mA. Después de medir una corriente total de 35 mA, se puede decir que
(a) R_1 está abierto **(b)** R_2 está abierto
(c) R_3 está abierto **(d)** el circuito está funcionando apropiadamente

12. Si un total de 100 mA entran a un circuito en paralelo compuesto de tres ramas, y por dos de las ramas circulan 40 mA y 20 mA, la corriente en la tercer rama es de

(a) 60 mA **(b)** 20 mA **(c)** 160 mA **(d)** 40 mA

13. En uno de los cinco resistores en paralelo de una tarjeta de circuito impreso se desarrolla un corto completo. El resultado más probable es que

(a) el resistor en cortocircuito se fundirá

(b) uno o más de los demás resistores se fundirán

(c) el fusible en la fuente de potencia se fundirá

(d) se modificarán los valores de resistencia

14. La disipación de potencia en cada una de las cuatro ramas en paralelo es de 1 W. La disipación total de potencia es de

(a) 1 W **(b)** 4 W **(c)** 0.25 W **(d)** 16 W

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 6-68.

1. Si R_1 se abre con el interruptor en la posición mostrada, el voltaje en la terminal *A* con respecto a tierra

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

2. Si se cambia el interruptor de la posición *A* a la posición *B*, la corriente total

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

3. Si R_4 se abre con el interruptor en la posición *C*, la corriente total

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

4. Si se desarrolla un corto entre *B* y *C* mientras el interruptor está en la posición *B*, la corriente total

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

Consulte la figura 6-74(b).

5. Si R_2 se abre, la corriente a través de R_1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

6. Si R_3 se abre, el voltaje entre sus extremos

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

7. Si R_1 se abre, el voltaje entre sus extremos

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

Consulte la figura 6-75.

8. Si la resistencia del reóstato R_2 se incrementa, la corriente a través de R_1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

9. Si el fusible se abre, el voltaje entre los extremos del reóstato R_2

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

10. Si el reóstato R_2 desarrolla un corto entre el rozador y tierra, la corriente a través del reóstato

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

Consulte la figura 6-79.

11. Si la fuente de 2.25 mA se abre mientras el interruptor está en la posición *C*, la corriente a través de *R*

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

12. Si la fuente de 2.25 mA se abre mientras el interruptor está en la posición *B*, la corriente a través de *R*

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

Consulte la figura 6-87.

13. Si las puntas 4 y 5 están en cortocircuito entre sí, la resistencia entre las puntas 3 y 6

(a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

14. Si la conexión inferior de R_1 se pone en cortocircuito con la conexión superior de R_5, la resistencia entre las puntas 1 y 2

    (a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

15. Si R_7 se abre, la resistencia entre las puntas 5 y 6

    (a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

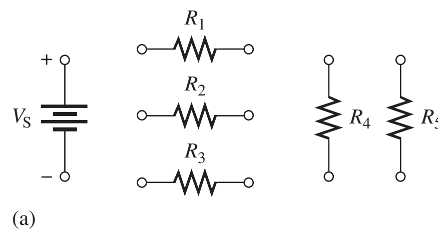
PROBLEMAS

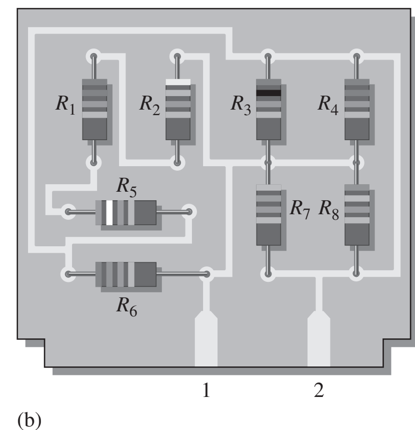
Un asterisco (*) indica los problemas más difíciles.
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 6–1 Resistores en paralelo

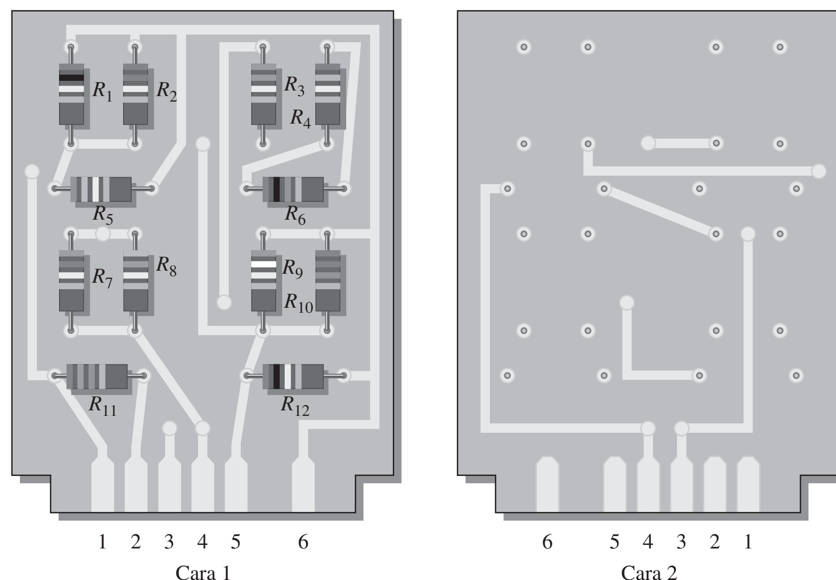
1. Muestre cómo conectar los resistores de la figura 6-65(a) en paralelo entre las terminales de una batería.
2. Determine si todos los resistores de la figura 6-65(b) están conectados o no en paralelo en la tarjeta de circuito impreso.

*3. Identifique los grupos de resistores que están en paralelo en la tarjeta de circuito impreso de doble cara mostrada en la figura 6-66.





▲ FIGURA 6–65



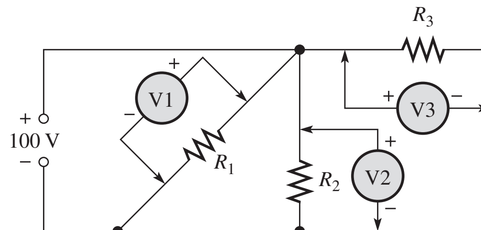
▲ FIGURA 6–66

SECCIÓN 6–2 Voltaje en un circuito en paralelo

4. ¿Cuál es el voltaje entre los extremos y la corriente a través de cada resistor en paralelo si el voltaje total es de 12 V y la resistencia total de 550 Ω? Hay cuatro resistores, todos de igual valor.

5. El voltaje de fuente en la figura 6-67 es de 100 V. ¿Cuánto voltaje lee cada uno de los medidores?

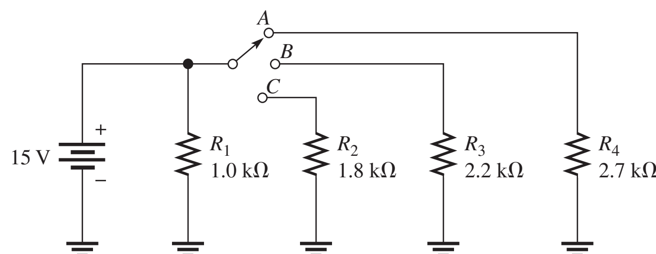
▶ FIGURA 6–67



6. ¿Cuál es la resistencia total del circuito visto desde la fuente de voltaje para cada posición del interruptor incluido en la figura 6-68?

7. ¿Cuál es el voltaje entre los extremos de cada resistor incluido en la figura 6-68 para cada posición del interruptor?

8. ¿Cuál es la corriente total suministrada por la fuente de voltaje que muestra la figura 6-68 para cada posición del interruptor?



▲ FIGURA 6–68

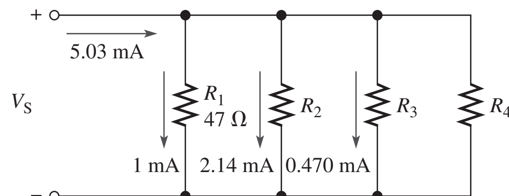
SECCIÓN 6–3 Ley de las corrientes de Kirchhoff

9. Se leen las siguientes corrientes en la misma dirección en un circuito de tres ramas en paralelo: 250 mA, 300 mA y 800 mA. ¿Cuál es el valor de la corriente que llega a la unión de las tres ramas?

10. Un total de 500 mA entra a cinco resistores en paralelo. Las corrientes a través de los resistores son de: 50 mA, 150 mA, 25 mA y 100 mA. ¿Cuál es la corriente a través del quinto resistor?

11. En el circuito de la figura 6-69, determine la resistencia en R_2, R_3 y R_4.

▶ FIGURA 6–69



***12.** En cierta habitación, el circuito eléctrico tiene una lámpara de cielo que consume 1.25 A y cuatro tomas de corriente de pared. Dos lámparas de mesa que consumen cada una 0.833 A están conectadas a dos tomas de corriente, y un calentador eléctrico que consume 10 A está conectado a la tercer toma de corriente. Cuando todos estos elementos están en uso, ¿cuánta corriente hay en la línea principal que abastece a la habitación? Si la línea principal está protegida por un cortacircuito de 15 A, ¿cuánta corriente puede ser absorbida de la cuarta toma de corriente? Trace un diagrama esquemático de esta instalación eléctrica.

* **13.** La resistencia total de un circuito en paralelo es de 25 Ω. ¿Cuál es la corriente a través de un resistor de 220 Ω que forma parte de este circuito si la corriente total es de 100 mA?

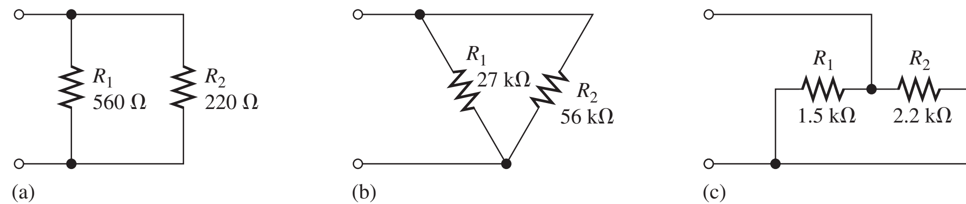
SECCIÓN 6–4 Resistencia total en paralelo

14. Los siguientes resistores están conectados en paralelo: 1.0 MΩ, 2.2 MΩ, 5.6 MΩ, 12 MΩ, y 22 MΩ. Determine la resistencia total.

15. Encuentre la resistencia total de cada uno de los siguientes grupos de resistores en paralelo:
(a) 560 Ω y 1000 Ω **(b)** 47 Ω y 56 Ω
(c) 1.5 kΩ, 2.2 kΩ, 10 kΩ **(d)** 1.0 MΩ, 470 kΩ, 1.0 kΩ, 2.7 MΩ

16. Calcule R_T en cada uno de los circuitos de la figura 6-70.

▶ FIGURA 6–70



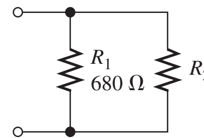
17. ¿Cuál es la resistencia total de doce resistores de 6.8 kΩ dispuestos en paralelo?

18. Tres grupos, uno de cinco resistores de 470 Ω, otro de diez resistores de 100 Ω, y uno más de dos resistores de 100 Ω están conectados en paralelo. ¿Cuál es la resistencia total para cada uno de los tres agrupamientos?

19. Encuentre la resistencia total de todo el circuito en paralelo descrito en el problema 18.

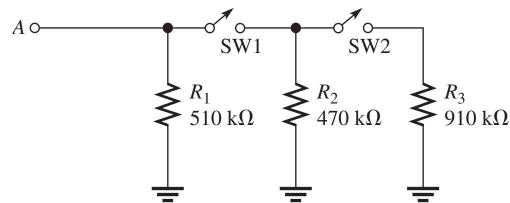
20. Si la resistencia total en la figura 6-71 es de 389.2 Ω, ¿cuál es el valor de R_2?

▶ FIGURA 6–71



21. ¿Cuál es la resistencia total entre el punto *A* y tierra en la figura 6-72 en las siguientes condiciones?
(a) SW1 y SW2 abiertos **(b)** SW1 cerrado, SW2 abierto
(c) SW1 abierto, SW2 cerrado **(d)** SW1 y SW2 cerrados

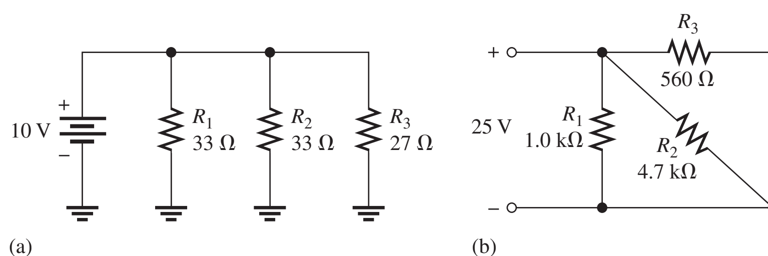
▶ FIGURA 6–72



SECCIÓN 6–5 Aplicación de la ley de Ohm

22. ¿Cuál es la corriente total en cada uno de los circuitos de la figura 6-73?

▶ FIGURA 6–73

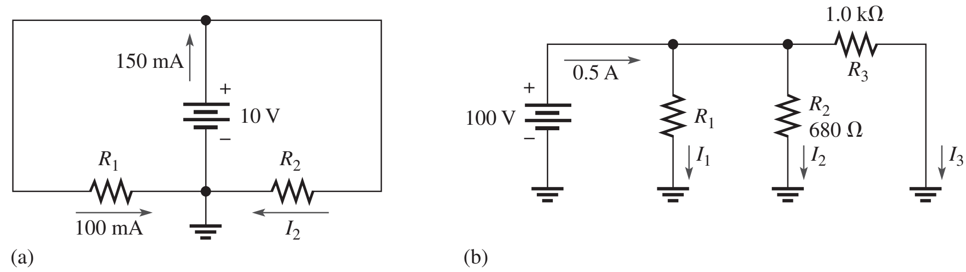


23. Tres resistores de 33 Ω están conectados en paralelo con una fuente de 110 V. ¿Cuál es la corriente suministrada por la fuente?

24. Cuatro resistores de igual valor están conectados en paralelo. Se aplican cinco volts al circuito en paralelo y se lee 1.11 mA en la fuente. ¿Cuál es el valor de cada resistor?

25. Muchos tipos de luces decorativas están conectados en paralelo. Si se conecta un juego de luces a una fuente de 110 V y si la resistencia en caliente del filamento de cada foco es de 2.2 kΩ, ¿cuál es la corriente a través de cada foco? ¿Por qué es mejor tener estos focos en paralelo y no en serie?

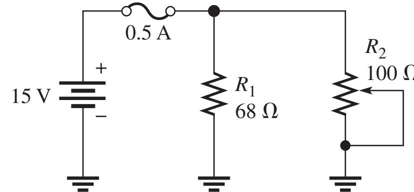
26. Encuentre los valores de las cantidades marcadas no especificadas en cada circuito de la figura 6-74.



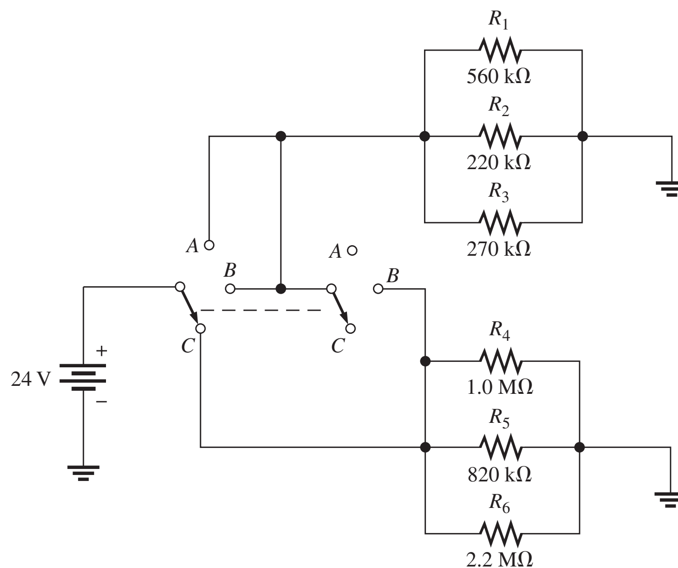
▲ **FIGURA 6–74**

27. ¿A qué valor mínimo se puede ajustar el reóstato de 100 Ω mostrado en la figura 6-75 antes de que el fusible de 0.5 A se funda?

▶ **FIGURA 6–75**



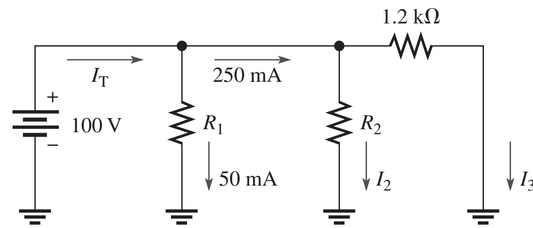
28. Determine la corriente total suministrada por la fuente y la corriente a través de cada resistor para cada una de las posiciones de interruptor mostradas en la figura 6-76.



▲ **FIGURA 6–76**

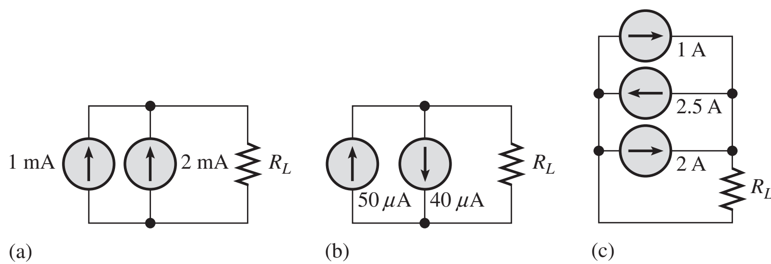
29. Encuentre los valores de las cantidades no especificadas en la figura 6-77.

▶ FIGURA 6–77



SECCIÓN 6–6 Fuentes de corriente en paralelo

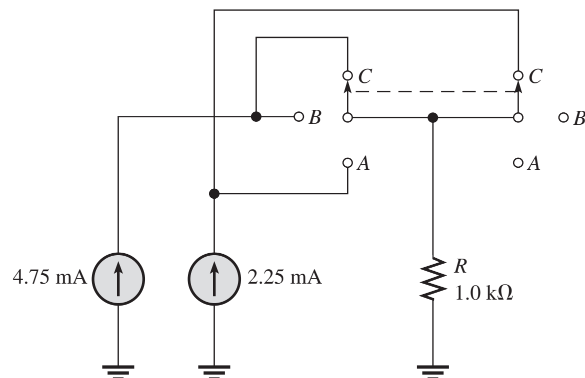
30. Determine la corriente a través de R_L en cada uno de los circuitos de la figura 6-78.



▲ FIGURA 6–78

31. Determine la corriente a través del resistor para cada una de las posiciones de interruptor calibradas en la figura 6-79.

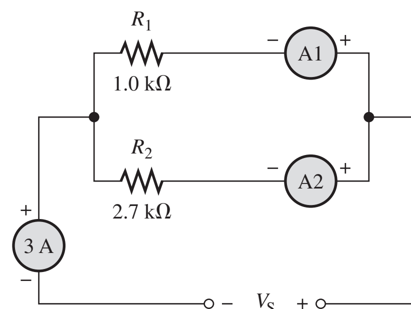
▶ FIGURA 6–79



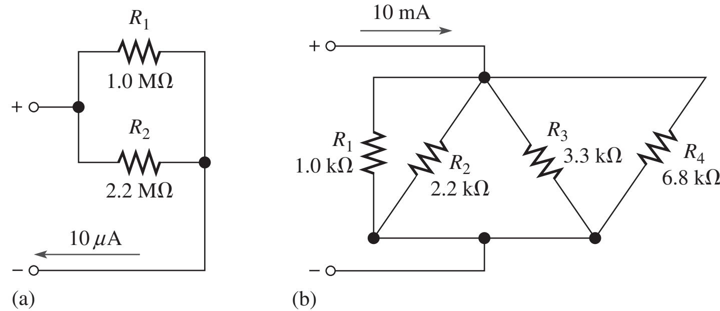
SECCIÓN 6–7 Divisores de corriente

32. ¿Cuánta corriente deberán indicar los medidores de la figura 6-80 a través de cada rama?

▶ FIGURA 6–80



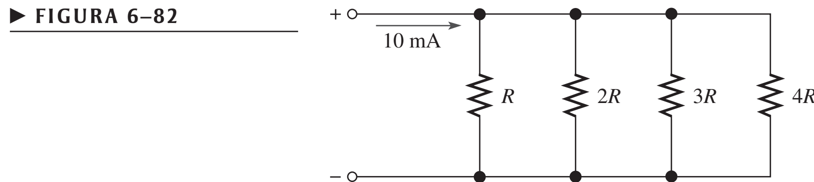
33. Determine la corriente en cada uno de los divisores de corriente mostrados en la figura 6-81.



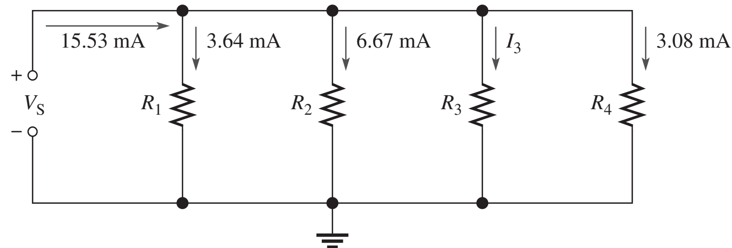
▲ **FIGURA 6–81**

34. ¿Cuál es la corriente a través de cada resistor mostrado en la figura 6-82? R es el resistor de valor más bajo, y todos los demás valores son múltiplos de éste como se indica.

▶ **FIGURA 6–82**



35. Determine todos los valores de resistor en la figura 6-83. $R_T = 773\ \Omega$.



▲ **FIGURA 6–83**

* **36.** **(a)** Determine el valor requerido del resistor en derivación R_{SH1} en el amperímetro de la figura 6-49 si la resistencia del movimiento de medidor es de 50 Ω.

(b) Encuentre el valor requerido para R_{SH2} en el circuito medidor de la figura 6-50 ($R_M = 50\ \Omega$).

***37.** En el mercado están disponibles resistores en derivación especialmente diseñados para detectar caídas de voltaje de 50 mV en aplicaciones de medición de corrientes altas. Se conecta un voltímetro de 50 mV, 10 kΩ de escala completa entre la derivación para realizar la medición.

(a) ¿Qué valor de resistencia en derivación se requiere para utilizar un medidor de 50 mV en una aplicación de medición de 50 A?

(b) ¿Cuánta corriente circula por el medidor?

SECCIÓN 6–8 Potencia en circuitos en paralelo

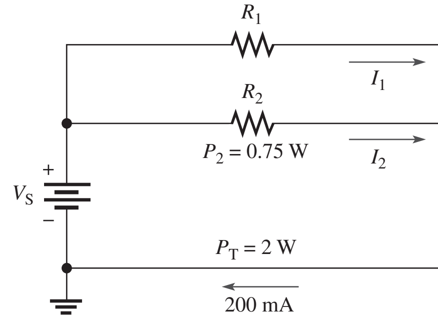
38. Cada resistor de un grupo de cinco dispuesto en paralelo maneja 250 mW. ¿Cuál es la potencia total?

39. Determine la potencia total en cada uno de los circuitos de la figura 6-81.

40. Seis focos están conectados en paralelo entre los extremos de una fuente de 110 V. Cada foco es de 75 W. ¿Cuál es la corriente a través de cada foco, y cuál es la corriente total?

*41. Encuentre los valores de las cantidades no especificadas en la figura 6-84.

▶ FIGURA 6–84



*42. Cierto circuito en paralelo está compuesto por resistores de sólo ½ W. La resistencia total es de 1.0 kΩ, y la corriente total es de 50 mA. Si cada resistor opera a la mitad de su nivel de potencia máxima, determine lo siguiente:

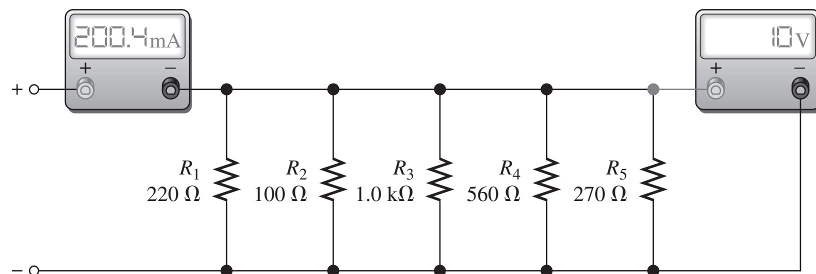
(a) El número de resistores **(b)** El valor de cada resistor

(c) La corriente en cada rama **(d)** El voltaje aplicado

SECCIÓN 6–10 Localización de fallas

43. Si en el problema 40 se funde uno de los focos, ¿cuánta corriente circulará a través de cada foco restante? ¿Cuál será la corriente total?

44. En la figura 6-85, se indican las mediciones de corriente y voltaje. ¿Se ha abierto un resistor, y, de ser así, cuál?

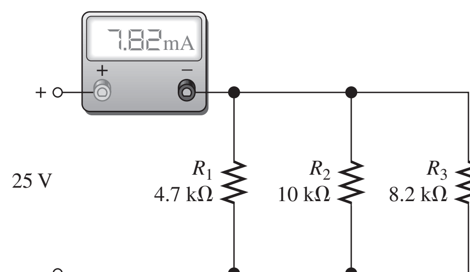


▲ FIGURA 6–85

45. ¿Qué está mal con el circuito de la figura 6-86?

46. ¿Qué está mal con el circuito de la figura 6-86 si el medidor lee 5.55 mA?

▶ FIGURA 6–86



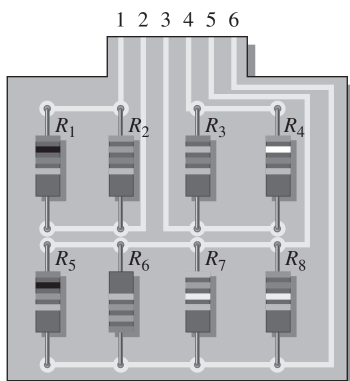
*47. Desarrolle un procedimiento de prueba para revisar la tarjeta de circuito mostrada en la figura 6-87 y asegurarse de que no hay componentes abiertos. Debe realizar esta prueba sin quitar el componente de la tarjeta. Describa el procedimiento en un formato detallado paso a paso.

*48. Para la tarjeta de circuito mostrada en la figura 6-88, determine la resistencia entre las siguientes puntas si hay un corto entre las puntas 2 y 4:

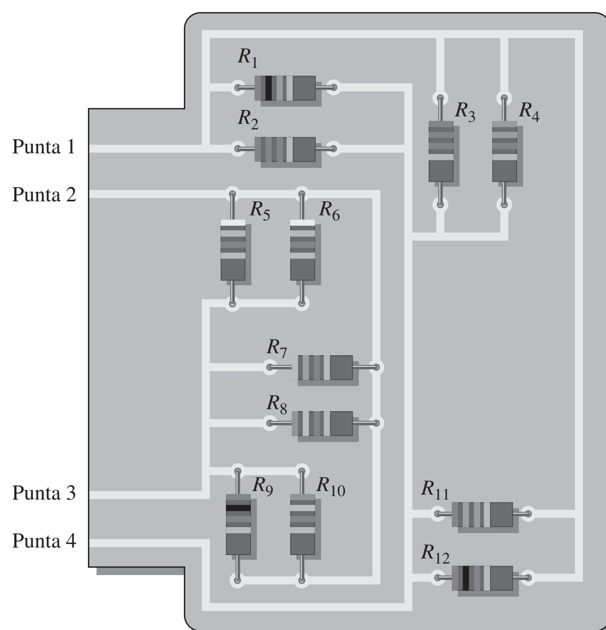
(a) 1 y 2 **(b)** 2 y 3 **(c)** 3 y 4 **(d)** 1 y 4

*49. Para el circuito mostrado en la figura 6-88, determine la resistencia entre las siguientes puntas si existe un corto entre las puntas 3 y 4:

(a) 1 y 2 **(b)** 2 y 3 **(c)** 2 y 4 **(d)** 1 y 4



▲ FIGURA 6–87



▲ FIGURA 6–88



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

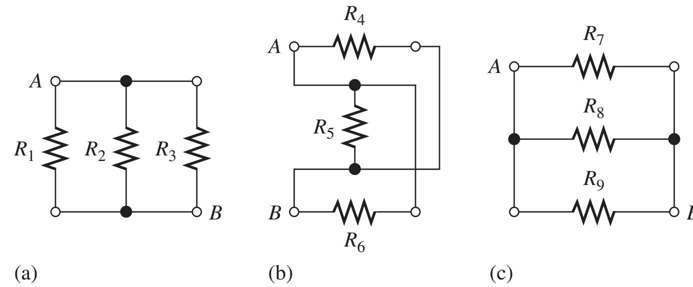
50. Abra el archivo P06-50 y mida la resistencia total en paralelo.
51. Abra el archivo P06-51. Determine por medición si hay un resistor abierto y, de ser así, mencione cuál.
52. Abra el archivo P06-52 y determine el valor de resistencia no especificado.
53. Abra el archivo P06-53 y determine el voltaje de fuente no especificado.
54. Abra el archivo P06-54 y localice la falla si es que hay una.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

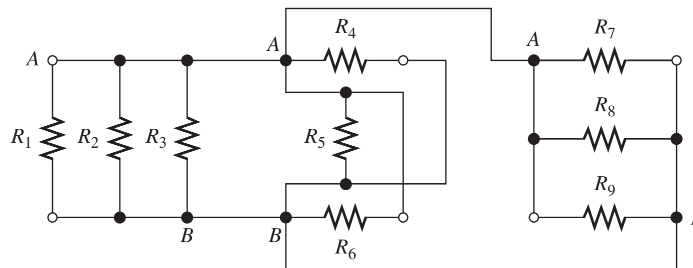
SECCIÓN 6–1 **Resistores en paralelo**

1. Los resistores en paralelo se conectan individualmente entre dos puntos distintos.
2. Un circuito en paralelo tiene más de una trayectoria para la corriente que circula entre dos puntos dados.
3. Vea la figura 6-89.



▲ FIGURA 6–89

4. Vea la figura 6–90.



▲ FIGURA 6–90

SECCIÓN 6–2 Voltaje en un circuito en paralelo

1. $V_{10\Omega} = V_{22\Omega} = 5$ V
2. $V_{R2} = 118$ V; $V_S = 118$ V
3. $V_{R1} = 50$ V y $V_{R2} = 50$ V
4. El voltaje es el mismo en todas las ramas en paralelo.

SECCIÓN 6–3 Ley de las corrientes de Kirchhoff

1. Ley de Kirchhoff: La suma algebraica de todas las corrientes presentes en una nodo es cero. La suma de las corrientes que entran al nodo es igual a la suma de las corrientes que salen de dicha unión.
2. $I_1 = I_2 = I_3 = I_T = 2.5$ mA
3. $I_{SALIDA} = 100\text{ mA} + 300\text{ mA} = 400$ mA
4. $I_1 = I_T - I_2 = 3\ \mu$A
5. $I_{ENTRADA} = 8\text{ mA} - 1\text{ mA} = 7$ mA; $I_{SALIDA} = 8\text{ mA} - 3\text{ mA} = 5$ mA

SECCIÓN 6–4 Resistencia total en paralelo

1. R_T disminuye con más resistores en paralelo.
2. La resistencia total en paralelo es menor que la más pequeña resistencia de rama.
3. $R_T = \dfrac{1}{(1/R_1) + (1/R_2) + \cdots + (1/R_n)}$
4. $R_T = R_1R_2/(R_1 + R_2)$
5. $R_T = R/n$
6. $R_T = (1.0\text{ k}\Omega)(2.2\text{ k}\Omega)/3.2\text{ k}\Omega = 688\ \Omega$
7. $R_T = 1.0\text{ k}\Omega/4 = 250\ \Omega$
8. $R_T = \dfrac{1}{1/47\ \Omega + 1/150\ \Omega + 1/100\ \Omega} = 26.4\ \Omega$

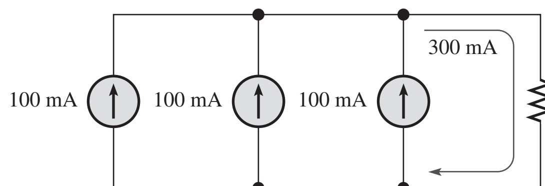
SECCIÓN 6–5 Aplicación de la ley de Ohm

1. $I_T = 10\text{ V}/22.7\ \Omega = 44.1\text{ mA}$
2. $V_S = (20\text{ mA})(222\ \Omega) = 4.44\text{ V}$
3. $I_1 = 4.44\text{ V}/680\ \Omega = 6.53\text{ mA}$; $I_2 = 4.44\text{ V}/330\ \Omega = 13.5\text{ mA}$
4. $R_T = 12\text{ V}/5.85\text{ mA} = 2.05\text{ k}\Omega$; $R = (2.05\text{ k}\Omega)(4) = 8.2\text{ k}\Omega$
5. $V = (100\text{ mA})(688\ \Omega) = 68.8\text{ V}$

SECCIÓN 6–6 Fuentes de corriente en paralelo

1. $I_T = 4(0.5\text{ A}) = 2\text{ A}$
2. Tres fuentes: vea la figura 6-91.
3. $I_{R_E} = 10\text{ mA} + 10\text{ mA} = 20\text{ mA}$

▶ FIGURA 6–91



SECCIÓN 6–7 Divisores de corriente

1. $I_x = (R_T/R_x)I_T$
2. $I_1 = \left(\dfrac{R_2}{R_1 + R_2}\right)I_T \qquad I_2 = \left(\dfrac{R_1}{R_1 + R_2}\right)I_T$
3. El resistor de 22 kΩ es el que tiene más corriente; el de 220 kΩ tiene menos corriente.
4. $I_1 = (680\ \Omega/1010\ \Omega)10\text{ mA} = 6.73\text{ mA}$; $I_2 = (330\ \Omega/1010\ \Omega)10\text{ mA} = 3.27\text{ mA}$
5. $I_3 = (114\ \Omega/470\ \Omega)4\text{ mA} = 970\ \mu\text{A}$

SECCIÓN 6–8 Potencia en circuitos en paralelo

1. Sume la potencia de cada resistor para obtener la potencia total.
2. $P_T = 238\text{ mW} + 512\text{ mW} + 109\text{ mW} + 876\text{ mW} = 1.74\text{ W}$
3. $P_T = (1\text{ A})^2(615\ \Omega) = 615\text{ W}$

SECCIÓN 6–9 Aplicaciones de circuitos en paralelo

1. $R_{\text{máx}} = 50\ \Omega$; $I_{\text{máx}} = 1\text{ mA}$
2. R_{SH} es menor que R_M porque los resistores en derivación deben permitir el paso de corrientes mucho mayores que la corriente a través del movimiento de medidor.

SECCIÓN 6–10 Localización de fallas

1. Cuando una rama se abre, el voltaje no cambia; la corriente total disminuye.
2. Si una rama se abre, la resistencia total en paralelo se incrementa.
3. Los focos restantes continúan encendidos.
4. Las corrientes en las ramas restantes son de 100 mA.
5. La rama con 120 mA está abierta.

Una aplicación de circuito

1. R_{SH} tiene la corriente máxima.
2. Intervalo de 25 mA: $R_{AB} = R_M = 6\ \Omega$

   Intervalo de 250 mA: $R_{AB} = R_M \| R_{SH} = 6\ \Omega \| 670\text{ m}\Omega = 603\text{ m}\Omega$

   Intervalo de 2.5 A: $R_{AB} = (R_1 + R_M) \| R_{SH} = (60.4\ \Omega + 6\ \Omega) \| 670\text{ m}\Omega =$

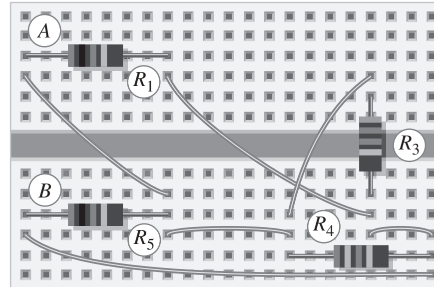
   $66.4\ \Omega \| 670\text{ m}\Omega = 663\text{ m}\Omega$

3. El circuito medidor de la figura 6-61 niega el efecto de la resistencia de contacto del interruptor.
4. 150 mA
5. Intervalo de 25 mA: 7.5 mA
   Intervalo de 250 mA: 75 mA
   Intervalo de 2.5 A: 750 mA

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

6–1 Vea la figura 6-92.

▶ FIGURA 6–92



6–2 Conecte la punta 1 a la 2 y la punta 3 a la 4

6–3 25 V

6–4 20 mA entran al nodo *A* y salen del nodo *B*

6–5 $I_T = 112$ mA, $I_2 = 50$ mA

6–6 2.5 mA; 5 mA

6–7 9.33 Ω

6–8 132 Ω

6–9 4 Ω

6–10 1044 Ω

6–11 1.83 mA; 1 mA

6–12 $I_1 = 20$ mA; $I_2 = 9.09$ mA; $I_3 = 35.7$ mA, $I_4 = 22.0$ mA

6–13 1.28 V

6–14 Mida R_T con un ohmmetro y calcule R_1 con $R_1 = 1/[(1/R_T) - (1/R_2) - (1/R_3)]$

6–15 30 mA

6–16 $I_1 = 3.27$ mA; $I_2 = 6.73$ mA

6–17 $I_1 = 59.4$ mA; $I_2 = 40.6$ mA

6–18 1.78 W

6–19 81 W

6–20 0.0347 μA

6–21 15.4 mA

6–22 Incorrecto, R_{10} (68 kΩ) debe estar abierto.

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (c) **3.** (b) **4.** (d) **5.** (a) **6.** (c) **7.** (c) **8.** (c)
9. (d) **10.** (b) **11.** (a) **12.** (d) **13.** (c) **14.** (b)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (c) **2.** (a) **3.** (c) **4.** (a) **5.** (c) **6.** (c) **7.** (c) **8.** (c)
9. (b) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (c) **13.** (a) **14.** (c) **15.** (a)

7 Circuitos en serie-paralelo

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Identificar las relaciones serie-paralelo
- Analizar circuitos en serie-paralelo
- Analizar divisores de voltaje con carga
- Determinar el efecto de carga de un voltímetro en un circuito
- Analizar redes en escalera
- Analizar y aplicar un puente de Wheatstone
- Localizar fallas en circuitos en serie-paralelo

TÉRMINOS CLAVE

- Corriente remanente
- Puente desequilibrado
- Puente equilibrado
- Puente Wheatstone

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, aprenderá cómo se puede utilizar un puente Wheatstone junto con un termistor en una aplicación de control de temperatura. En esta aplicación, el circuito está diseñado para encender y apagar un elemento calefactor con el cual la temperatura de un líquido contenido en un tanque se mantiene a un nivel deseado.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio y materiales suplementarios para este capítulo están disponibles en http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En los capítulos 5 y 6, se estudiaron individualmente los circuitos en serie y los circuitos en paralelo. En este capítulo, se combinan los resistores en serie y en paralelo dentro de circuitos en serie-paralelo. En muchas situaciones prácticas, se tendrán combinaciones tanto en serie como en paralelo dentro del mismo circuito y se aplicarán los métodos de análisis aprendidos para circuitos en serie y circuitos en paralelo.

En este capítulo se introducen importantes tipos de circuitos en serie-paralelo. Estos circuitos incluyen el divisor de voltaje con carga resistiva, la red en escalera, y el puente Wheatstone.

El análisis de circuitos en serie-paralelo requiere el uso de la ley de Ohm, las leyes del voltaje y de la corriente de Kirchhoff, y los métodos para determinar resistencia total y potencia que fueron estudiados en los últimos dos capítulos. El tema de los divisores de voltaje sometidos a carga es importante porque este tipo de circuito se encuentra en muchas situaciones prácticas. Un ejemplo es el circuito polarizador divisor de voltaje para un amplificador con transistores, el cual se estudiará en un curso posterior. Las redes en escalera son importantes en varias áreas, incluido el principal tipo de conversión de digital a analógico que se estudiará en un curso de fundamentos digitales. El puente Wheatstone se utiliza en muchos tipos de sistemas para la medición de parámetros desconocidos, lo cual incluye a la mayoría de las escalas electrónicas.

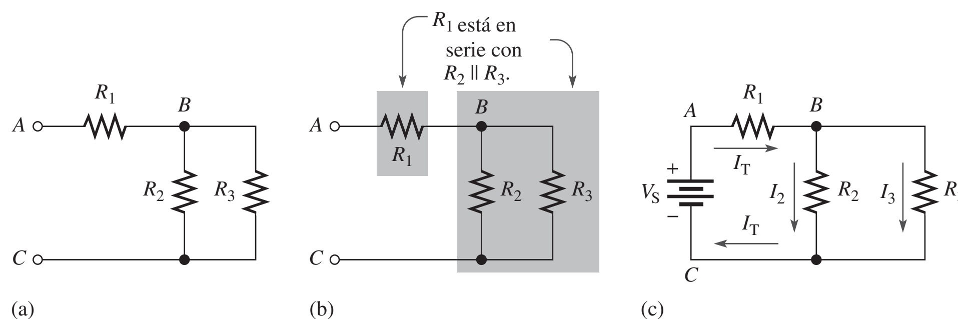
7–1 IDENTIFICACIÓN DE RELACIONES EN SERIE-PARALELO

Un circuito en serie-paralelo consiste en combinaciones de trayectorias para corriente dispuestas tanto en serie como en paralelo. Es importante ser capaz de identificar la forma en que están dispuestos los componentes en un circuito en función de sus relaciones en serie y en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Identificar las relaciones en serie-paralelo**
  - Reconocer cómo se relaciona cada resistor incluido en un circuito dado con los demás resistores
  - Determinar las relaciones en serie y en paralelo en una tarjeta de circuito impreso

La figura 7-1(a) muestra un ejemplo de una combinación simple de resistores en serie-paralelo. Observe que la resistencia del punto *A* al punto *B* es R_1. La resistencia del punto *B* al punto *C* es R_2 y R_3 en paralelo ($R_2 \| R_3$). La resistencia total del punto *A* al punto *C* es R_1 en serie con la combinación en paralelo de R_2 y R_3, tal como indica la figura 7-1(b).

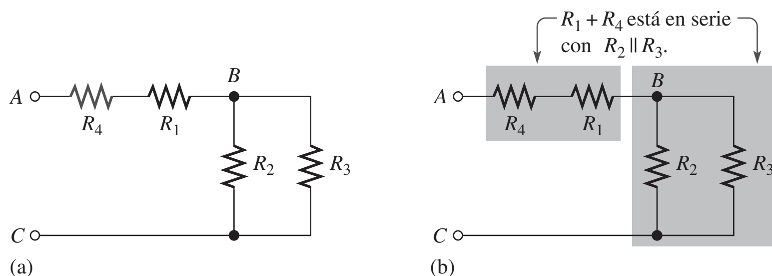


▲ **FIGURA 7–1**

Circuito resistivo simple en serie-paralelo.

Cuando el circuito de la figura 7-1(a) se conecta a una fuente de voltaje como se muestra en la figura 7-1(c), la corriente total pasa por R_1 y se divide en el punto *B* hacia las dos trayectorias en paralelo. Estas dos corrientes de rama se recombinan entonces y la corriente total entra a la terminal negativa de la fuente como se indica.

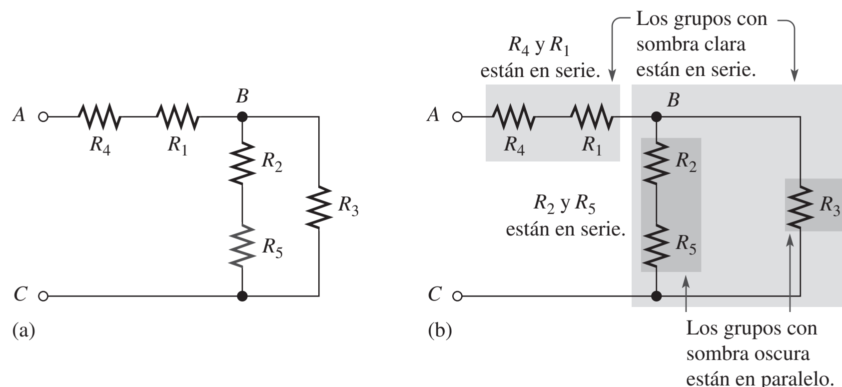
Ahora, para ilustrar las relaciones en serie-paralelo, se incrementará la complejidad del circuito mostrado en la figura 7-1(a) paso a paso. En la figura 7-2(a), se conecta un resistor (R_4) en serie con R_1. La resistencia entre los puntos *A* y *B* ahora es $R_1 + R_4$, y esta combinación está en serie con la combinación en paralelo de R_2 y R_3, tal como ilustra la figura 7-2(b).



▲ **FIGURA 7–2**

R_4 se agregó al circuito en serie con R_1.

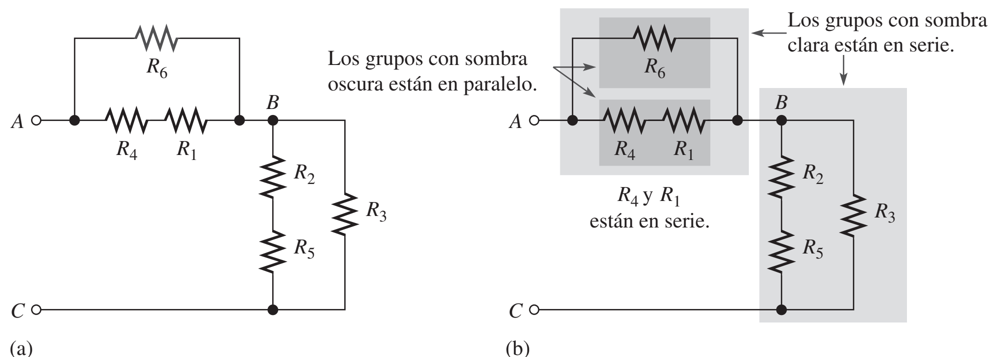
En la figura 7-3(a), R_5 está conectado en serie con R_2. La combinación en serie de R_2 y R_5 está en paralelo con R_3. Toda esta combinación en serie-paralelo está en serie con la combinación en serie de R_1 y R_4, tal como ilustra la figura 7-3(b).



▲ **FIGURA 7–3**

R_5 se agregó al circuito en serie con R_2.

En la figura 7-4(a), R_6 está conectado en paralelo con la combinación en serie de R_1 y R_4. La combinación en serie-paralelo de R_1, R_4 y R_6 está en serie con la combinación en serie-paralelo de R_2, R_3 y R_5, como indica la figura 7-4(b).

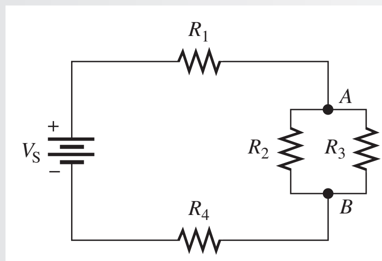


▲ **FIGURA 7–4**

R_6 se agregó al circuito en paralelo con la combinación en serie de R_1 y R_4.

EJEMPLO 7–1 Identifique las relaciones en serie-paralelo que haya en la figura 7-5.

▶ **FIGURA 7–5**

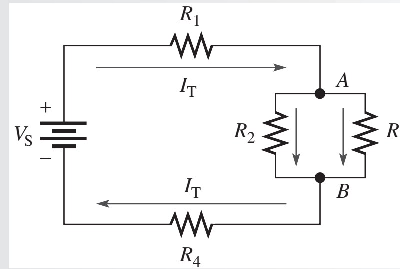


Solución Se empieza en la terminal positiva de la fuente, siguiendo las trayectorias de corriente. Toda la corriente producida por la fuente debe irse a través de R_1, que está en serie con el resto del circuito.

La corriente total toma dos rutas cuando llega al nodo A. Una parte circula por R_2 y otra por R_3. Los resistores R_2 y R_3 están en paralelo entre sí, y esta combinación en paralelo está en serie con R_1.

En el nodo B, las corrientes a través de R_2 y R_3 se juntan de nuevo. Por tanto, la corriente total circula por R_4. El resistor R_4 está en serie con R_1 y la combinación en paralelo de R_2 y R_3. Las corrientes se muestran en la figura 7-6, donde I_T es la corriente total.

▶ FIGURA 7–6



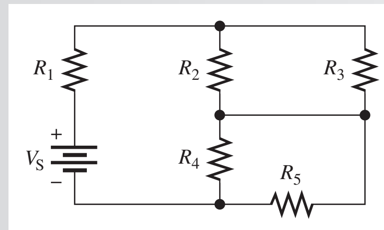
En suma, R_1 y R_4 están en serie con la combinación en paralelo de R_2 y R_3 como lo establece la siguiente expresión:

$$R_1 + R_2\|R_3 + R_4$$

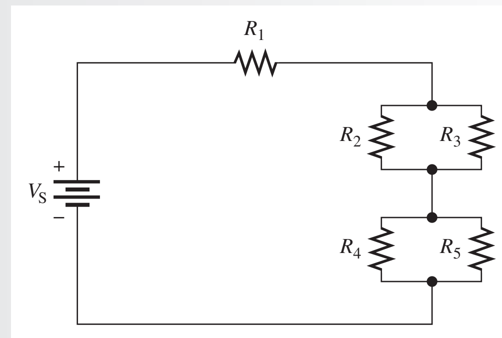
Problema relacionado* Si en la figura 7-6 se conecta otro resistor, R_5, desde el nodo A hasta la terminal negativa de la fuente, ¿cuál es su relación con los demás resistores?

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 7–2 Identifique las relaciones en serie-paralelo que haya en la figura 7-7.



▲ FIGURA 7–7



▲ FIGURA 7–8

Solución En ocasiones es más fácil discernir una configuración particular de un circuito si se traza en forma diferente. En este caso, el diagrama esquemático del circuito se traza de nuevo en la figura 7-8, que ilustra mejor las relaciones serie-paralelo. Ahora se puede advertir que R_2 y R_3

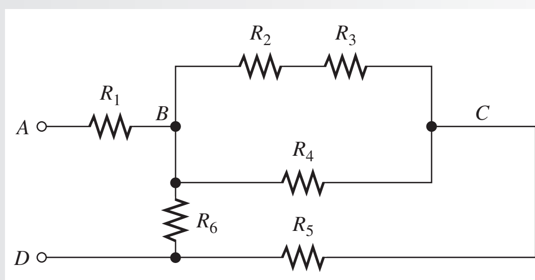
están en paralelo entre sí, y también que R_4 y R_5 están en paralelo entre sí. Ambas combinaciones en paralelo están en serie una con otra y con R_1 como lo establece la siguiente expresión:

$$R_1 + R_2 \| R_3 + R_4 \| R_5$$

Problema relacionado Si en el figura 7-8 se conecta un resistor desde el extremo inferior de R_3 hasta el extremo superior de R_5, ¿qué efecto tiene en el circuito?

EJEMPLO 7–3 Describa la combinación en serie-paralelo que hay entre las terminales *A* y *D* en la figura 7-9.

▶ **FIGURA 7–9**



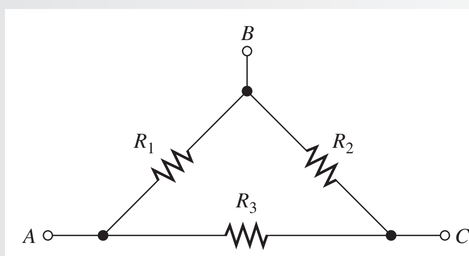
Solución Entre los nodos *B* y *C*, existen dos trayectorias en paralelo. La trayectoria inferior se compone de R_4, y la superior de una combinación en serie de R_2 y R_3. Esta combinación en paralelo está en serie con R_5. La combinación R_2, R_3, R_4, R_5 está en paralelo con R_6. El resistor R_1 está en serie con toda esta combinación como lo establece la siguiente expresión:

$$R_1 + R_6 \| (R_5 + R_4 \| (R_2 + R_3))$$

Problema relacionado Si en la figura 7-9 se conecta una resistor de *C* a *D*, describa su relación en paralelo.

EJEMPLO 7–4 Describa la resistencia total que hay entre cada par de terminales en la figura 7-10.

▶ **FIGURA 7–10**



Solución

1. De *A* a *B*: R_1 está en paralelo con la combinación en serie de R_2 y R_3.

$$R_1 \| (R_2 + R_3)$$

2. De *A* a *C*: R_3 está en paralelo con la combinación en serie de R_1 y R_2.

$$R_3 \| (R_1 + R_2)$$

3. De *B* a *C*: R_2 está en paralelo con la combinación en serie de R_1 y R_3.

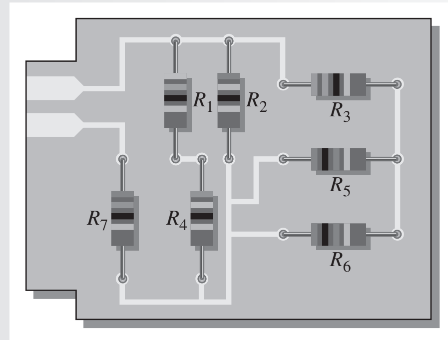
$$R_2 \| (R_1 + R_3)$$

Problema relacionado En la figura 7-10, describa la resistencia total entre cada terminal y una tierra agregada si se conecta un resistor nuevo, R_4, de C a tierra. Ninguno de los resistores existentes se conecta directamente a tierra.

Casi siempre, la disposición física de los componentes en un circuito impreso o en una tarjeta prototipo no guarda ninguna semejanza con las relaciones reales existentes en el circuito. Trazando el circuito, y reacomodando los componentes en el papel en una forma reconocible, se pueden determinar las relaciones serie-paralelo.

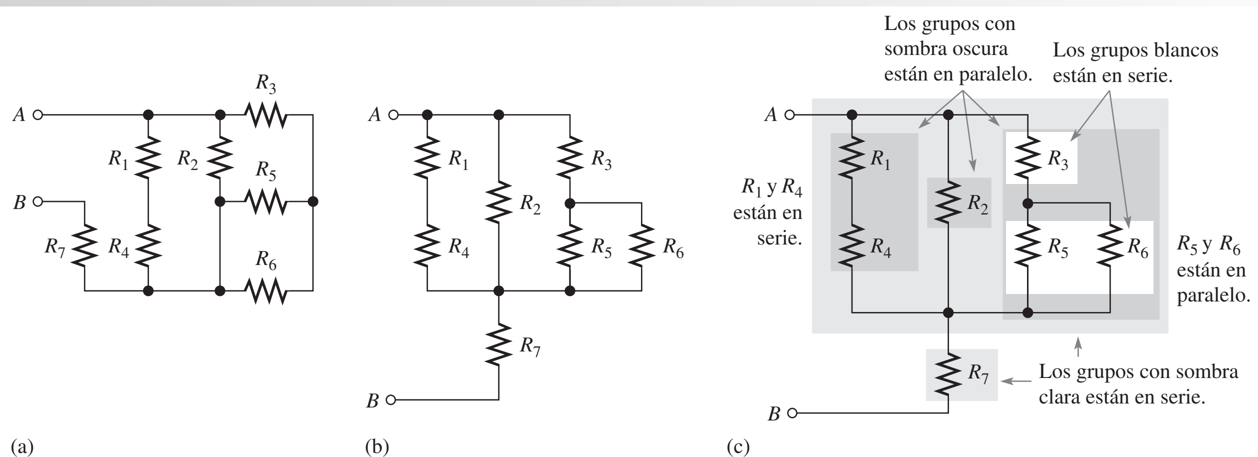
EJEMPLO 7–5 Determine las relaciones de los resistores del circuito impreso mostrado en la figura 7-11.

▶ FIGURA 7–11



Solución En la figura 7-12(a), se trazó el diagrama esquemático empleando la misma configuración que tienen los resistores de la tarjeta. En la parte (b), los resistores están reacomodados de modo que las relaciones serie-paralelo sean más evidentes. Los resistores R_1 y R_4 están en serie; la combinación $R_1 + R_4$ está en paralelo con R_2; R_5 y R_6 están en paralelo y esta combinación está en serie con R_3. La combinación en serie-paralelo de R_3, R_5 y R_6 está en paralelo tanto con R_2 como con la combinación $R_1 + R_4$. Toda esta combinación en serie-paralelo está en serie con R_7. La figura 7-12(c) ilustra estas relaciones. Al convertir en forma de ecuación,

$$R_{AB} = (R_5\|R_6 + R_3)\|R_2\|(R_1 + R_4) + R_7$$

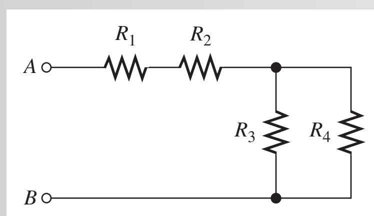


▲ FIGURA 7–12

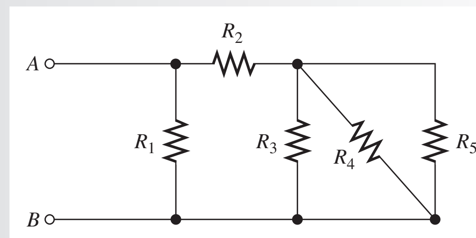
Problema relacionado Si R_5 se retirara del circuito, ¿cuáles serían las relaciones de R_3 y R_6?

REPASO DE LA SECCIÓN 7-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Defina el *término circuito resistivo en serie-paralelo*.
2. Cierto circuito en serie-paralelo se describe como sigue: R_1 y R_2 están en paralelo. Esta combinación en paralelo está en serie con otra combinación en paralelo de R_3 y R_4. Trace el circuito.
3. En el circuito de la figura 7-13, describa las relaciones serie-paralelo de los resistores.
4. ¿Cuáles resistores están en paralelo en la figura 7-14?



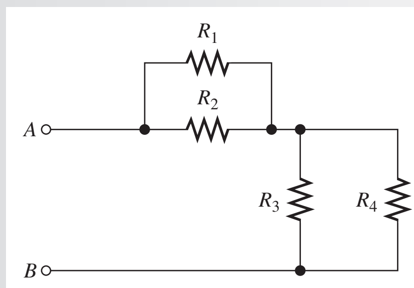
▲ FIGURA 7–13



▲ FIGURA 7–14

5. Describa las configuraciones en paralelo existentes en la figura 7-15.
6. ¿Están en serie las combinaciones en paralelo mostradas en la figura 7-15?

▶ FIGURA 7–15



7–2 ANÁLISIS DE CIRCUITOS RESISTIVOS EN SERIE-PARALELO

El análisis de circuitos en serie-paralelo puede ser abordado de muchas maneras, según la información que se requiera y qué valores del circuito se conozcan. Los ejemplos presentados en esta sección no constituyen una cobertura exhaustiva, pero proporcionan una idea de cómo abordar el análisis de circuitos en serie-paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar circuitos en serie paralelo**
  - Determinar la resistencia total
  - Determinar todas las corrientes
  - Determinar todas las caídas de voltaje

Si se conocen la ley de Ohm, las leyes de Kirchhoff, la fórmula del divisor de voltaje y la fórmula del divisor de corriente, y se sabe cómo aplicarlas, será posible resolver la mayoría de los problemas de análisis de circuitos resistivos. La habilidad para reconocer combinaciones en serie-paralelo es, desde luego, esencial. Algunos circuitos, como el puente Wheatstone desequi-

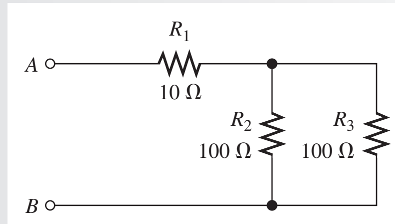
librado, no disponen de combinaciones básicas en serie-paralelo. En estos casos se requieren otros métodos, los cuales se analizarán más adelante.

Resistencia total

En el capítulo 5 se aprendió cómo determinar la resistencia total en serie y, en el capítulo 6, cómo determinar la resistencia total en paralelo. Para encontrar la resistencia total (R_T) de una combinación en serie-paralelo, simplemente se definen las relaciones serie-paralelo; en seguida se realizan los cálculos que previamente se aprendieron. Los dos ejemplos siguientes ilustran este método general.

EJEMPLO 7–6 Determine R_T para el circuito mostrado en la figura 7-16 entre las terminales A y B.

▶ FIGURA 7–16



Solución En primer lugar, calcule la resistencia en paralelo equivalente de R_2 y R_3. Como R_2 y R_3 son de igual valor, se utiliza la ecuación 6-4.

$$R_{2\|3} = \frac{R}{n} = \frac{100\ \Omega}{2} = 50\ \Omega$$

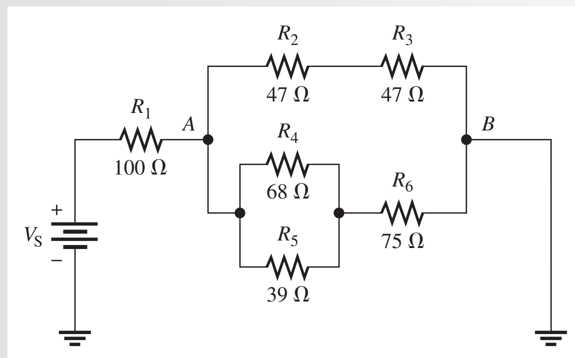
Observe que el término $R_{2\|3}$ se utiliza aquí para designar la resistencia total de una parte de un circuito y distinguirla de la resistencia total, R_T, del circuito completo.

Ahora, como R_1 está en serie con $R_{2\|3}$, sume sus valores como sigue:

$$R_T = R_1 + R_{2\|3} = 10\ \Omega + 50\ \Omega = \mathbf{60\ \Omega}$$

Problema relacionado En la figura 7-16, determine R_T si el valor de R_3 cambia a 82 Ω.

EJEMPLO 7–7 Encuentre la resistencia total entre las terminales positiva y negativa de la batería mostrada en la figura 7-17.



▲ FIGURA 7–17

Solución En la rama superior, R_2 está en serie con R_3. Esta combinación en serie se designa como R_{2+3} y es igual a $R_2 + R_3$.

$$R_{2+3} = R_2 + R_3 = 47\ \Omega + 47\ \Omega = 94\ \Omega$$

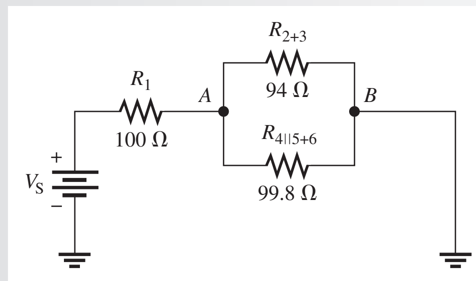
En la rama inferior, R_4 y R_5 están en paralelo entre sí. Esta combinación en paralelo se designa como $R_{4\|5}$.

$$R_{4\|5} = \frac{R_4R_5}{R_4 + R_5} = \frac{(68\ \Omega)(39\ \Omega)}{68\ \Omega + 39\ \Omega} = 24.8\ \Omega$$

Asimismo en la rama inferior, la combinación en paralelo de R_4 y R_5 está en serie con R_6. Esta combinación en paralelo se designa como $R_{4\|5+6}$.

$$R_{4\|5+6} = R_6 + R_{4\|5} = 75\ \Omega + 24.8\ \Omega = 99.8\ \Omega$$

La figura 7-18 muestra el circuito original en una forma equivalente simplificada.



▲ FIGURA 7–18

Ahora es posible determinar la resistencia equivalente entre A y B. Es R_{2+3} en paralelo con $R_{4\|5+6}$. Calcule la resistencia equivalente como sigue:

$$R_{AB} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_{2+3}} + \dfrac{1}{R_{4\|5+6}}} = \frac{1}{\dfrac{1}{94\ \Omega} + \dfrac{1}{99.8\ \Omega}} = 48.4\ \Omega$$

Por último, la resistencia total es R_1 en serie con R_{AB}.

$$R_T = R_1 + R_{AB} = 100\ \Omega + 48.4\ \Omega = \mathbf{148.4\ \Omega}$$

Problema relacionado Determine R_T si, en la figura 7-17, se agrega un resistor de 68 Ω en paralelo de A a B.

Corriente total

Una vez que se conocen la corriente total y el voltaje de fuente, se puede aplicar la ley de Ohm para determinar la corriente total en un circuito. La corriente total es el voltaje de fuente dividido entre la resistencia total.

$$I_T = \frac{V_S}{R_T}$$

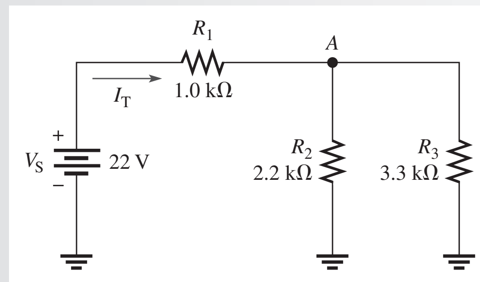
Por ejemplo, suponiendo que el voltaje de fuente es de 30 V, la corriente total en el circuito del ejemplo 7-7 (figura 7-17) es

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{30\ \text{V}}{148.4\ \Omega} = 202\ \text{mA}$$

Corrientes de rama

Con la fórmula del divisor de corriente, la ley de la corriente de Kirchhoff, la ley de Ohm, o mediante combinaciones de éstas, se puede calcular la corriente en cualquier rama de un circuito en serie-paralelo. En algunos casos, posiblemente se requiera la aplicación repetida de la fórmula para encontrar una corriente dada. Los dos ejemplos siguientes ayudarán a entender el procedimiento. (Observe que los subíndices para las variables de corriente (I) concuerdan con los subíndices de R; por ejemplo, la corriente a través de R_1 se designa como I_1.)

EJEMPLO 7–8 Encuentre la corriente a través de R_2 y de R_3 en la figura 7-19.



▲ FIGURA 7–19

Solución En primer lugar, identifique la relación serie-paralelo. A continuación, determine cuánta corriente entra al nodo A. Ésta es la corriente total. Para determinar I_T, se debe conocer R_T.

$$R_T = R_1 + \frac{R_2R_3}{R_2 + R_3} = 1.0\,\text{k}\Omega + \frac{(2.2\,\text{k}\Omega)(3.3\,\text{k}\Omega)}{2.2\,\text{k}\Omega + 3.3\,\text{k}\Omega} = 1.0\,\text{k}\Omega + 1.32\,\text{k}\Omega = 2.32\,\text{k}\Omega$$

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{22\text{ V}}{2.32\,\text{k}\Omega} = 9.48\text{ mA}$$

Para determinar la corriente a través de R_2, aplique la regla del divisor de corriente para dos ramas como se dio en el capítulo 6.

$$I_2 = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)I_T = \left(\frac{3.3\,\text{k}\Omega}{5.5\,\text{k}\Omega}\right)9.48\text{ mA} = \mathbf{5.69\text{ mA}}$$

Ahora aplique la ley de la corriente de Kirchhoff para determinar la corriente a través de R_3.

$$I_T = I_2 + I_3$$
$$I_3 = I_T - I_2 = 9.48\text{ mA} - 5.69\text{ mA} = \mathbf{3.79\text{ mA}}$$

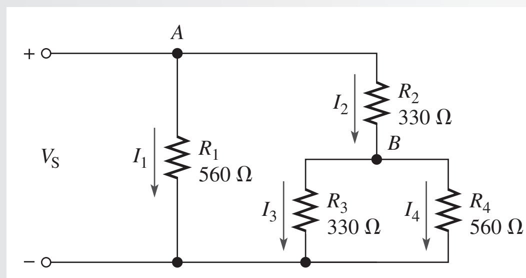
Problema relacionado Se conecta un resistor de 4.7 kΩ en paralelo con R_3 en la figura 7-19. Determine la corriente a través del nuevo resistor.



Use el archivo Multisim E07-08 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 7–9 En la figura 7-20, determine la corriente a través de R_4 si $V_S = 50$ V.

▶ **FIGURA 7–20**



Solución Primero, determine la corriente (I_2) hacia el nodo B. Una vez que conozca esta corriente, use la fórmula del divisor de corriente para encontrar I_4, la corriente a través de R_4.

Observe que hay dos ramas principales en el circuito. La rama situada más a la izquierda se compone sólo de R_1; la que está más a la derecha tiene R_2 en serie con la combinación en paralelo de R_3 y R_4. En estas dos ramas principales el voltaje es el mismo e igual a 50 V. Calcule la resistencia equivalente ($R_{2+3)\|4)}$) de la rama principal localizada más a la derecha y luego aplique la ley de Ohm; I_2 es la corriente total a través de esta rama principal. Por tanto,

$$R_{2+3\|4} = R_2 + \frac{R_3R_4}{R_3 + R_4} = 330\ \Omega + \frac{(330\ \Omega)(560\ \Omega)}{890\ \Omega} = 538\ \Omega$$

$$I_2 = \frac{V_S}{R_{2+3\|4}} = \frac{50\text{ V}}{538\ \Omega} = 93\text{ mA}$$

Use la fórmula del divisor de corriente de dos resistores para calcular I_4.

$$I_4 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4}\right)I_2 = \left(\frac{330\ \Omega}{890\ \Omega}\right)93\text{ mA} = \mathbf{34.5\ mA}$$

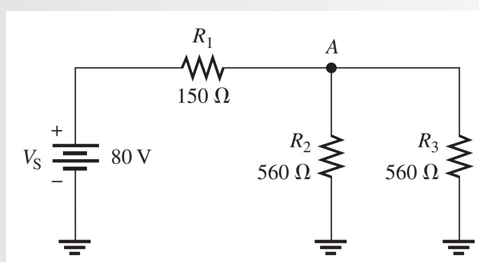
Problema relacionado En la figura 7-20, determine la corriente a través de R_1 y R_3 si $V_S = 20$ V.

Caídas de voltaje

Para determinar el voltaje entre ciertas partes de un circuito en serie-paralelo, se puede utilizar la fórmula del divisor de voltaje dada en el capítulo 5, la ley del voltaje de Kirchhoff, la ley de Ohm, o combinaciones de éstas. Los tres ejemplos siguientes ilustran el uso de las fórmulas. (Los subíndices para V concuerdan con los subíndices para la R correspondiente: V_1 es el voltaje entre los extremos de R_1; V_2 es el voltaje entre los extremos de R_2, etcétera.)

EJEMPLO 7–10 En la figura 7-21, determine la caída de voltaje del nodo A a tierra. En seguida determine el voltaje (V_1) entre los extremos de R_1.

▶ **FIGURA 7–21**



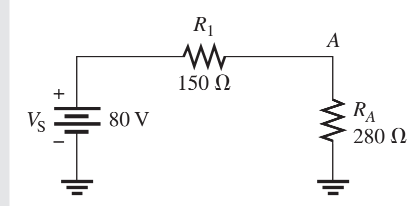
Solución Observe que en este circuito R_2 y R_3 están en paralelo. Como su valor es igual, su resistencia equivalente del nodo A a tierra es

$$R_A = \frac{560\ \Omega}{2} = 280\ \Omega$$

En el circuito equivalente mostrado en la figura 7-22, R_1 está en serie con R_A. La resistencia total del circuito vista desde la fuente es

$$R_T = R_1 + R_A = 150\ \Omega + 280\ \Omega = 430\ \Omega$$

▶ FIGURA 7–22



Use la fórmula del divisor de voltaje para determinar el voltaje entre la combinación en paralelo de la figura 7-21 (entre el nodo A y tierra).

$$V_A = \left(\frac{R_A}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{280\ \Omega}{430\ \Omega}\right)80\ \text{V} = \mathbf{52.1\ V}$$

Ahora use la ley del voltaje de Kirchhoff para determinar V_1.

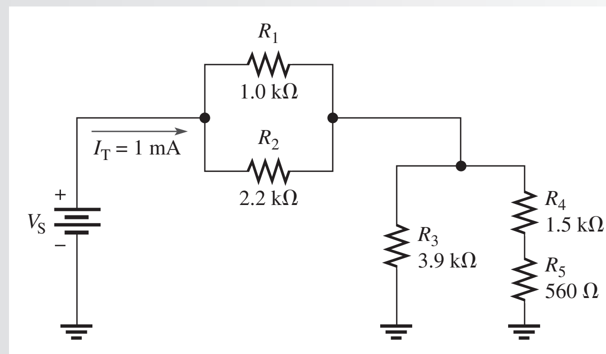
$$V_S = V_1 + V_A$$
$$V_1 = V_S - V_A = 80\ \text{V} - 52.1\ \text{V} = \mathbf{27.9\ V}$$

Problema relacionado En la figura 7-21, determine V_A y V_1 si el valor de R_1 se cambia a 220 Ω.



Use el archivo Multisim E07-10 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 7–11 Determine la caída de voltaje de un lado a otro de cada resistor mostrado en el circuito de la figura 7-23.



▲ FIGURA 7–23

Solución La fuente de voltaje no se proporciona, pero se conoce la corriente total a partir de la figura. Como R_1 y R_2 están en paralelo, cada uno tiene el mismo voltaje. La corriente a través de R_1 es

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)I_T = \left(\frac{2.2\text{ k}\Omega}{3.2\text{ k}\Omega}\right)1\text{ mA} = 688\ \mu\text{A}$$

Los voltajes entre los extremos de R_1 y R_2 son

$$V_1 = I_1R_1 = (688\ \mu\text{A})(1.0\text{ k}\Omega) = \mathbf{688\ mV}$$
$$V_2 = V_1 = \mathbf{688\ mV}$$

La combinación en serie de R_4 y R_5 forma la resistencia de rama, R_{4+5}. Aplique la fórmula del divisor de corriente para determinar la corriente a través de R_3.

$$I_3 = \left(\frac{R_{4+5}}{R_3 + R_{4+5}}\right)I_T = \left(\frac{2.06\text{ k}\Omega}{5.96\text{ k}\Omega}\right)1\text{ mA} = 346\ \mu\text{A}$$

El voltaje entre los extremos de R_3 es

$$V_3 = I_3R_3 = (346\ \mu\text{A})(3.9\text{ k}\Omega) = \mathbf{1.35\ V}$$

Las corrientes a través de R_4 y R_5 son las mismas porque estos resistores están en serie.

$$I_4 = I_5 = I_T - I_3 = 1\text{ mA} - 346\ \mu\text{A} = 654\ \mu\text{A}$$

Calcule los voltajes entre los extremos de R_4 y R_5 como sigue:

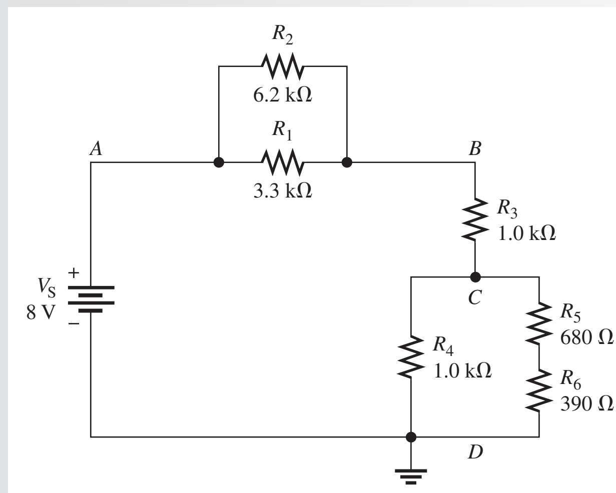
$$V_4 = I_4R_4 = (654\ \mu\text{A})(1.5\text{ k}\Omega) = \mathbf{981\ mV}$$
$$V_5 = I_5R_5 = (654\ \mu\text{A})(560\ \Omega) = \mathbf{366\ mV}$$

Problema relacionado ¿Cuál es el voltaje de fuente, V_S, en el circuito de la figura 7-23?



Use el archivo Multisim E07-11 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 7–12 Determine la caída de voltaje entre los extremos de cada resistor mostrado en la figura 7-24.



▲ **FIGURA 7–24**

Solución Como en la figura se da el voltaje total, este problema se resuelve mediante la fórmula del divisor de voltaje. Primero, se tiene que reducir cada combinación en paralelo a una resistencia equivalente. Como R_1 y R_2 están en paralelo entre A y B, combine sus valores.

$$R_{AB} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(3.3\text{ k}\Omega)(6.2\text{ k}\Omega)}{9.5\text{ k}\Omega} = 2.15\text{ k}\Omega$$

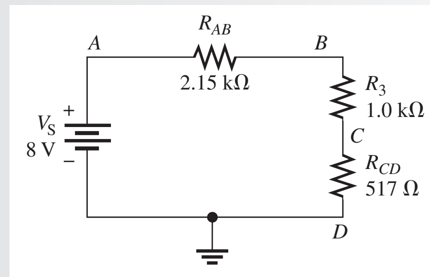
Como R_4 está en paralelo con la combinación en serie de R_5 y R_6 (R_{5+6}) entre C y D, combine estos valores.

$$R_{CD} = \frac{R_4R_{5+6}}{R_4 + R_{5+6}} = \frac{(1.0\text{ k}\Omega)(1.07\text{ k}\Omega)}{2.07\text{ k}\Omega} = 517\ \Omega$$

El circuito equivalente se traza en la figura 7-25. La resistencia total del circuito es

$$R_T = R_{AB} + R_3 + R_{CD} = 2.15\text{ k}\Omega + 1.0\text{ k}\Omega + 517\ \Omega = 3.67\text{ k}\Omega$$

▶ **FIGURA 7–25**



A continuación, use la fórmula del divisor de voltaje para determinar los voltajes en el circuito equivalente.

$$V_{AB} = \left(\frac{R_{AB}}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{2.15\text{ k}\Omega}{3.67\text{ k}\Omega}\right)8\text{ V} = 4.69\text{ V}$$

$$V_{CD} = \left(\frac{R_{CD}}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{517\ \Omega}{3.67\text{ k}\Omega}\right)8\text{ V} = 1.13\text{ V}$$

$$V_3 = \left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{1.0\text{ k}\Omega}{3.67\text{ k}\Omega}\right)8\text{ V} = \mathbf{2.18\text{ V}}$$

Consulte la figura 7-24. V_{AB} es igual al voltaje entre los extremos de R_1 y R_2, por tanto

$$V_1 = V_2 = V_{AB} = \mathbf{4.69\text{ V}}$$

V_{CD} es el voltaje entre los extremos de R_4 y entre los extremos de la combinación en serie de R_5 y R_6. Por consiguiente,

$$V_4 = V_{CD} = \mathbf{1.13\text{ V}}$$

Ahora aplique la fórmula del divisor de voltaje a la combinación en serie de R_5 y R_6 para obtener V_5 y V_6.

$$V_5 = \left(\frac{R_5}{R_5 + R_6}\right)V_{CD} = \left(\frac{680\ \Omega}{1070\ \Omega}\right)1.13\text{ V} = \mathbf{718\text{ mV}}$$

$$V_6 = \left(\frac{R_6}{R_5 + R_6}\right)V_{CD} = \left(\frac{390\ \Omega}{1070\ \Omega}\right)1.13\text{ V} = \mathbf{412\text{ mV}}$$

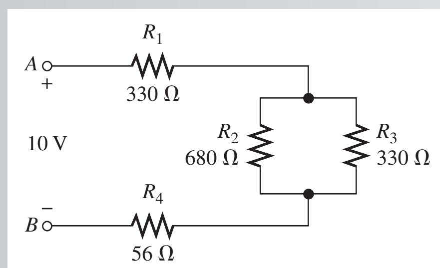
Problema relacionado R_2 se retira del circuito de la figura 7-24. Calcule V_{AB}, V_{BC}, y V_{CD}.



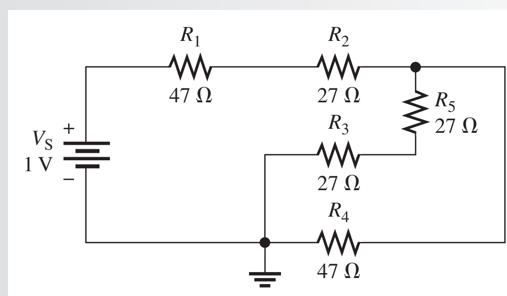
Use el archivo Multisim E07-12 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 7-2

1. Enliste cuatro leyes y fórmulas de circuito que puedan ser necesarias en el análisis de circuitos en serie-paralelo.
2. Encuentre la resistencia total entre *A* y *B* en el circuito de la figura 7-26.
3. Determine la corriente a través de R_3 en la figura 7-26.
4. Determine la caída de voltaje entre los extremos de R_2 en la figura 7-26.
5. En la figura 7-27, determine R_T e I_T "vistas" por la fuente.



▲ **FIGURA 7–26**



▲ **FIGURA 7–27**

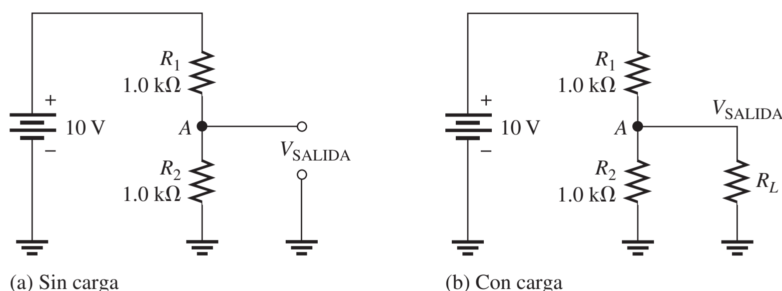
7–3 DIVISORES DE VOLTAJE CON CARGAS RESISTIVAS

Los divisores de voltaje se introdujeron en el capítulo 5. En esta sección, se aprenderá cómo las cargas resistivas afectan la operación de circuitos divisores de voltaje.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **• Analizar divisores de voltaje sometidos a carga**
  - Determinar el efecto de una carga resistiva en un circuito divisor de voltaje
  - Definir el término *corriente remanente*

El divisor de voltaje mostrado en la figura 7-28(a) produce un voltaje de salida (V_{SALIDA}) de 5 V porque los dos resistores son del mismo valor. Este voltaje es el *voltaje de salida sin carga*. Cuando un resistor de carga, R_L, se conecta de la salida a tierra como se muestra en la figura 7-28(b), el voltaje de salida se reduce en una cantidad que depende del valor de R_L. El resistor de carga está en paralelo con R_2, por lo que se reduce la resistencia del nodo *A* a tierra y, en consecuencia,

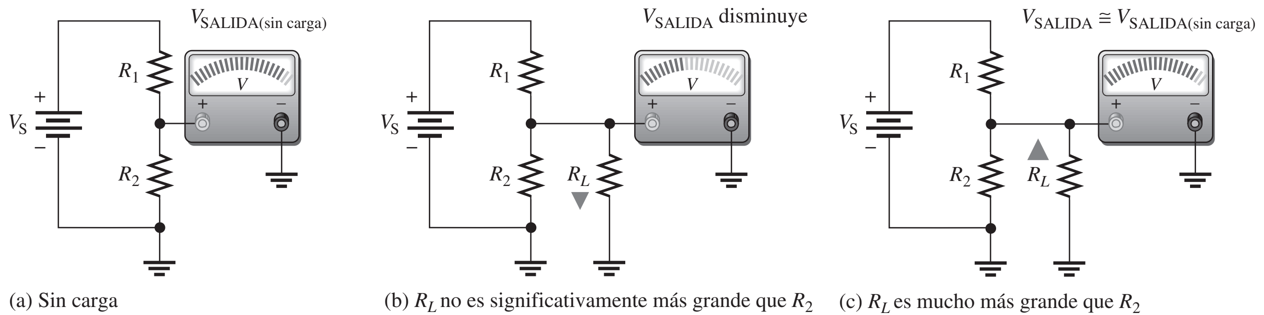


▲ **FIGURA 7–28**

Divisor de voltaje con salidas tanto con carga como sin carga.

también se reduce el voltaje entre los extremos de la combinación en paralelo. Este es un efecto de la aplicación de carga a un divisor de voltaje. Otro efecto de una carga es que se extrae más corriente de la fuente porque la resistencia total del circuito se reduce.

Mientras más grande es R_L, en comparación con R_2, menos se reduce el voltaje de salida con respecto a su valor sin carga, como ilustra la figura 7-29. Cuando dos resistores se conectan en paralelo y uno de ellos es mucho más grande que el otro, la resistencia total se aproxima al valor de la resistencia más pequeña.



▲ **FIGURA 7–29**

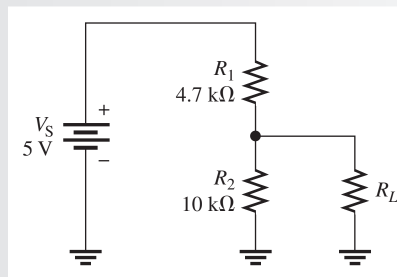
Efecto de un resistor de carga.

EJEMPLO 7–13

(a) Determine el voltaje de salida sin carga del divisor de voltaje mostrado en la figura 7-30.

(b) Determine los voltajes de salida con carga del divisor de voltaje de la figura 7-30 para los siguientes valores de resistencia de carga: $R_L = 10\ \text{k}\Omega$ y $R_L = 100\ \text{k}\Omega$.

▶ **FIGURA 7–30**



Solución

(a) El voltaje de salida sin carga es

$$V_{SALIDA(sin\ carga)} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S = \left(\frac{10\ \text{k}\Omega}{14.7\ \text{k}\Omega}\right)5\ \text{V} = \mathbf{3.40\ V}$$

(b) Con el resistor de carga de 10 kΩ conectado, R_L está en paralelo con R_2, lo que da

$$R_2 \| R_L = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{100\ \text{M}\Omega}{20\ \text{k}\Omega} = 5\ \text{k}\Omega$$

El circuito equivalente se muestra en la figura 7-31(a). El voltaje de salida con carga es

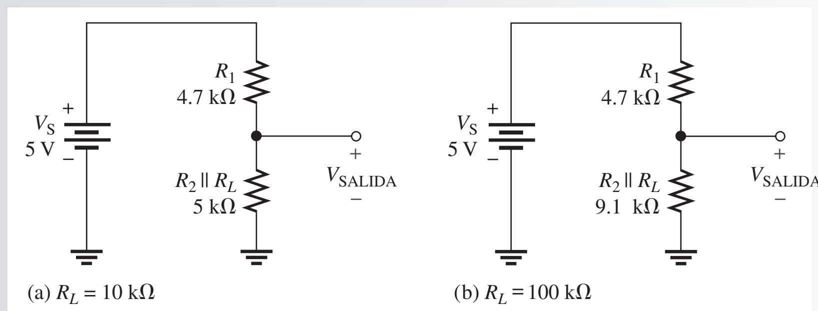
$$V_{SALIDA(con\ carga)} = \left(\frac{R_2 \| R_L}{R_1 + R_2 \| R_L}\right)V_S = \left(\frac{5\ \text{k}\Omega}{9.7\ \text{k}\Omega}\right)5\ \text{V} = \mathbf{2.58\ V}$$

Con la carga de 100 kΩ, la resistencia de la salida a tierra es

$$R_2 \| R_L = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{(10\ \text{k}\Omega)(100\ \text{k}\Omega)}{110\ \text{k}\Omega} = 9.1\ \text{k}\Omega$$

El circuito equivalente se muestra en la figura 7-31(b). El voltaje de salida con carga es

$$V_{SALIDA(con\ carga)} = \left(\frac{R_2 \| R_L}{R_1 + R_2 \| R_L}\right) V_S = \left(\frac{9.1\ \text{k}\Omega}{13.8\ \text{k}\Omega}\right) 5\ \text{V} = \mathbf{3.30\ V}$$



▲ FIGURA 7–31

Para el valor más pequeño de R_L, la reducción en V_{SALIDA} es

$$3.40\ \text{V} - 2.58\ \text{V} = 0.82\ \text{V}$$

Para el valor más grande de R_L, la reducción en V_{SALIDA} es

$$3.40\ \text{V} - 3.30\ \text{V} = 0.10\ \text{V}$$

Esto ilustra el efecto de carga de R_L en el divisor de voltaje.

Problema relacionado En la figura 7-30, determine V_{SALIDA} para una resistencia de carga de 1.0 MΩ.



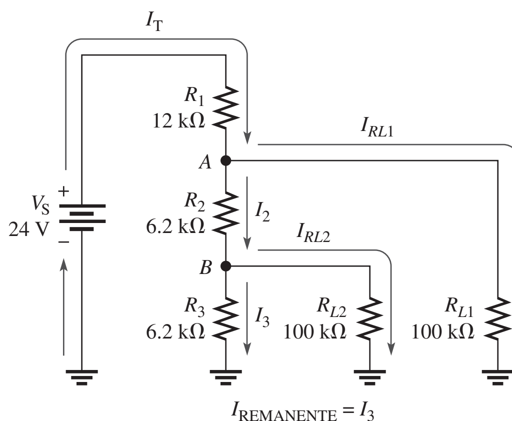
Use el archivo Multisim E07-13 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Corriente de carga y corriente remanente

En un circuito divisor de voltaje de tomas múltiples, la corriente total extraída de la fuente se compone de corrientes que circulan por los resistores de carga, llamadas *corrientes de carga*, y los resistores divisores. La figura 7-32 muestra un divisor de voltaje con dos salidas de voltaje o dos tomas. Observe que la corriente total, I_T, que circula por R_1 entra en el nodo A, donde se divide en I_{RL1} a través de R_{L1}, y en I_2 a través de R_2. En el nodo B, la corriente I_2 se divide en I_{RL2}

▶ FIGURA 7–32

Corrientes en un divisor de voltaje de dos tomas sometido a carga.



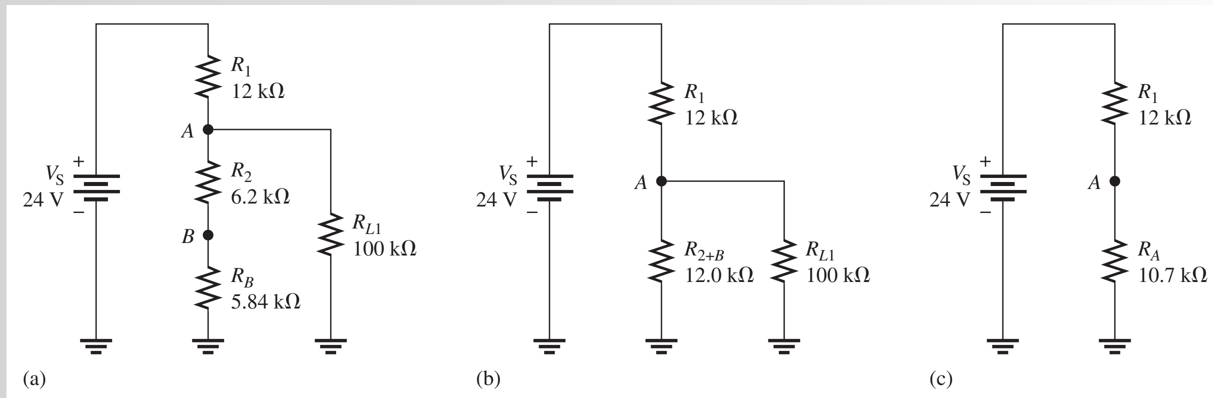
a través de R_{RL2} y en I_3 a través de R_3. A I_3 se le llama **corriente remanente**, y es la corriente que queda después de restar la corriente de carga total del total de corriente presente en el circuito.

$$I_{\text{REMANENTE}} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2}$$ **Ecuación 7–1**

EJEMPLO 7–14 Determine las corrientes de carga I_{RL1} e I_{RL2} y la corriente remanente I_3 en el divisor de voltaje de dos tomas con carga mostrado en la figura 7-32.

Solución La resistencia equivalente del nodo A a tierra es el resistor de carga R_{L1} de 100 kΩ en paralelo con la combinación de R_2 en serie con la combinación en paralelo de R_3 y R_{L2}. Primero determine los valores de resistencia, R_3 en paralelo con R_{L2} se designa como R_B. El circuito equivalente resultante se muestra en la figura 7-33(a).

$$R_B = \frac{R_3 R_{L2}}{R_3 + R_{L2}} = \frac{(6.2\text{ k}\Omega)(100\text{ k}\Omega)}{106.2\text{ k}\Omega} = 5.84\text{ k}\Omega$$



▲ **FIGURA 7–33**

R_2 en serie con R_B se designa como R_{2+B}. El circuito equivalente resultante se muestra en la figura 7-33(b).

$$R_{2+B} = R_2 + R_B = 6.2\text{ k}\Omega + 5.84\text{ k}\Omega = 12.0\text{ k}\Omega$$

R_{L1} en paralelo con R_{2+B} se designa como R_A. El circuito equivalente resultante se muestra en la figura 7-33(c).

$$R_A = \frac{R_{L1} R_{2+B}}{R_{L1} + R_{2+B}} = \frac{(100\text{ k}\Omega)(12.0\text{ k}\Omega)}{112\text{ k}\Omega} = 10.7\text{ k}\Omega$$

R_A es la resistencia total del nodo A a tierra. La resistencia total del circuito es

$$R_T = R_A + R_1 = 10.7\text{ k}\Omega + 12\text{ k}\Omega = 22.7\text{ k}\Omega$$

Determine el voltaje entre los extremos de R_{L1} como sigue, utilizando el circuito equivalente mostrado en la figura 7-33(c):

$$V_{RL1} = V_A = \left(\frac{R_A}{R_T}\right)V_S = \left(\frac{10.7\text{ k}\Omega}{22.7\text{ k}\Omega}\right)24\text{ V} = 11.3\text{ V}$$

La corriente de carga a través de R_{L1} es

$$I_{RL1} = \frac{V_{RL1}}{R_{L1}} = \left(\frac{11.3\text{ V}}{100\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{113\ \mu A}$$

Determine el voltaje en el nodo B utilizando el circuito equivalente de la figura 7-33(a) y el voltaje en el nodo A.

$$V_B = \left(\frac{R_B}{R_{2+B}}\right)V_A = \left(\frac{5.84\text{ k}\Omega}{12.0\text{ k}\Omega}\right)11.3\text{ V} = 5.50\text{ V}$$

La corriente de carga a través de R_{L2} es

$$I_{RL2} = \frac{V_{RL2}}{R_{L2}} = \frac{V_B}{R_{L2}} = \frac{5.50\text{ V}}{100\text{ k}\Omega} = \mathbf{55\ \mu A}$$

La corriente remanente es

$$I_3 = \frac{V_B}{R_3} = \frac{5.50\text{ V}}{6.2\text{ k}\Omega} = \mathbf{887\,\mu A}$$

Problema relacionado En la figura 7-32, ¿cómo se puede reducir la corriente remanente sin afectar las corrientes de carga?



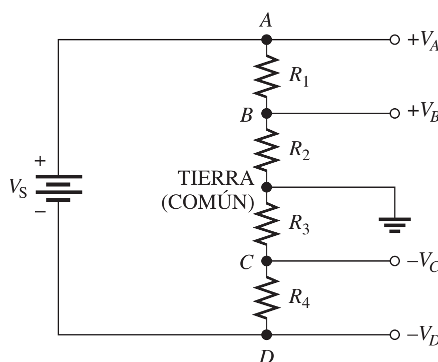
Use el archivo Multisim E07-14 para verificar los resultados calculados en este ejemplo.

Divisores de voltaje bipolar

Un ejemplo de un divisor de voltaje que produce tanto voltajes positivos como negativos a partir de una sola fuente se muestra en la figura 7-34. Observe que ni la terminal positiva ni la terminal negativa de la fuente están conectadas a la tierra de referencia o común. Los voltajes en los nodos A y B son positivos con respecto a la tierra de referencia, y los voltajes en los nodos C y D son negativos con respecto a la tierra de referencia.

▶ **FIGURA 7–34**

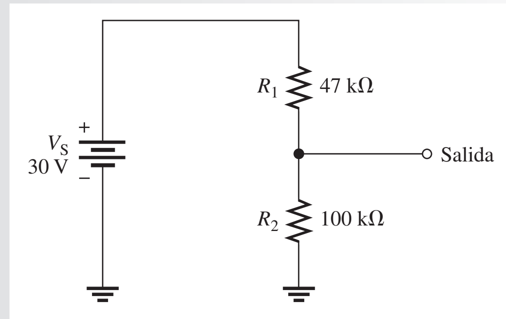
Divisor de voltaje bipolar. Los voltajes positivos y negativos son con respecto a la tierra de referencia.



REPASO DE LA SECCIÓN 7-3

1. En un divisor de voltaje, se conecta un resistor de carga a una toma de salida. ¿Qué efecto tiene el resistor de carga en el voltaje de salida en esta toma?
2. Un resistor de carga de valor más grande hará que el voltaje de salida cambie menos de lo que cambiaría con un valor más pequeño. (F o V)
3. Para el divisor de voltaje mostrado en la figura 7-35, determine el voltaje de salida sin carga con respecto a tierra. Determine también el voltaje de salida con un resistor de carga de 10 kΩ conectado entre la salida.

▶ FIGURA 7–35



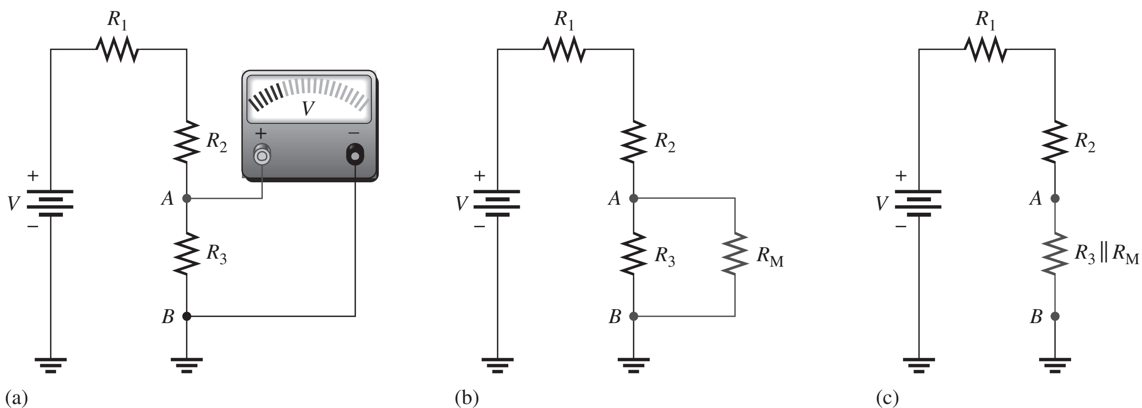
7–4 EFECTO DE CARGA DE UN VOLTÍMETRO

Como vimos, los voltímetros deben conectarse en paralelo con un resistor para medir el voltaje entre los extremos del resistor. Debido a su resistencia interna, un voltímetro aplica carga al circuito y afectará, en cierto grado, el voltaje que se esté midiendo. Hasta ahora, se ha ignorado el efecto de carga porque la resistencia interna de un voltímetro es muy alta, y normalmente tiene un efecto insignificante en el circuito que está siendo medido. Sin embargo, cuando la resistencia interna del voltímetro no es suficientemente más grande que la resistencia del circuito entre los extremos del cual está conectado, el efecto de carga hará que el voltaje medido sea menor que su valor real. Siempre se deberá estar consciente de este efecto.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar el efecto de carga de un voltímetro en un circuito**
  - Explicar por qué un voltímetro puede cargar un circuito
  - Analizar la resistencia interna de un voltímetro

Cuando un voltímetro se conecta a un circuito como indica, por ejemplo, la figura 7-36(a), su resistencia interna aparece en paralelo con R_3, según muestra la parte (b). La resistencia de A a B



▲ FIGURA 7–36

Efecto de carga de un voltímetro.

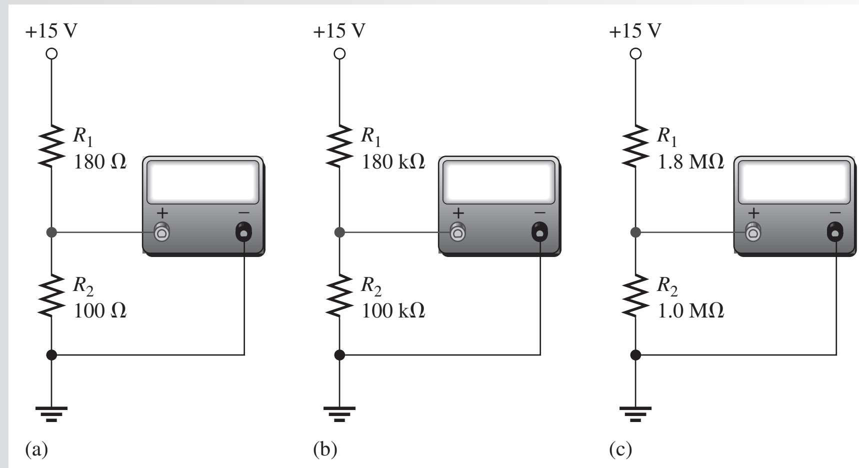
se altera por el efecto de carga de la resistencia interna del voltímetro, R_M, y es igual a $R_3 \| R_M$, tal como indica la parte (c).

Si R_M es mucho más grande que R_3, la resistencia de A a B cambia muy poco, y el medidor indica el voltaje real. Si R_M no es suficientemente más grande que R_3, la resistencia de A a B se reduce de manera significativa, y el voltaje entre los extremos de R_3 se altera por el efecto de carga del medidor. Una buena regla empírica es que *si el efecto de carga es menor al 10%, casi siempre puede ser ignorado, según la precisión requerida*.

Dos categorías de voltímetros son el voltímetro analógico electromagnético (comúnmente llamado VOM, por sus siglas en inglés), cuya resistencia interna es determinada por su factor de sensibilidad, y el digital (el tipo más comúnmente utilizado y denominado DMM, por sus siglas en inglés), cuya resistencia también es típicamente de por lo menos 10 MΩ. El voltímetro digital presenta menos problemas de carga que el electromagnético porque las resistencias internas de los multímetros digitales son mucho más altas.

EJEMPLO 7–15

¿Cuánto afecta el voltímetro digital al voltaje que se está midiendo en cada uno de los circuitos mostrados en la figura 7-37? Suponga que la resistencia de entrada del medidor (R_M) es de 10 MΩ.



▲ **FIGURA 7–37**

Solución Para mostrar las pequeñas diferencias más claramente, los resultados se expresan con más de tres cifras significativas en este ejemplo.

(a) Consulte la figura 7-37(a). El voltaje sin carga entre los extremos de R_2 en el circuito divisor de voltaje es

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{280\ \Omega}\right)15\text{ V} = 5.357\text{ V}$$

La resistencia del medidor en paralelo con R_2 es

$$R_2 \| R_M = \left(\frac{R_2 R_M}{R_2 + R_M}\right) = \frac{(100\ \Omega)(10\text{ M}\Omega)}{10.0001\text{ M}\Omega} = 99.999\ \Omega$$

El voltaje medido en realidad por el medidor es

$$V_2 = \left(\frac{R_2 \| R_M}{R_1 + R_2 \| R_M}\right)V_S = \left(\frac{99.999\ \Omega}{279.999\ \Omega}\right)15\text{ V} = 5.357\text{ V}$$

El voltímetro no tiene un efecto de carga medible.

(b) Consulte la figura 7-37(b).

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S = \left(\frac{100\text{ k}\Omega}{280\text{ k}\Omega}\right)15\text{ V} = 5.357\text{ V}$$

$$R_2 \| R_M = \frac{R_2 R_M}{R_2 + R_M} = \frac{(100\text{ k}\Omega)(10\text{ M}\Omega)}{10.1\text{ M}\Omega} = 99.01\text{ k}\Omega$$

El voltaje medido en realidad por el medidor es

$$V_2 = \left(\frac{R_2 \| R_M}{R_1 + R_2 \| R_M}\right)V_S = \left(\frac{99.01\text{ k}\Omega}{279.01\text{ k}\Omega}\right)15\text{ V} = 5.323\text{ V}$$

El efecto de carga del voltímetro reduce el voltaje en una cantidad muy pequeña.

(c) Consulte la figura 7-37(c).

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S = \left(\frac{1.0\text{ M}\Omega}{2.8\text{ M}\Omega}\right)15\text{ V} = 5.357\text{ V}$$

$$R_2 \| R_M = \frac{R_2 R_M}{R_2 + R_M} = \frac{(1.0\text{ M}\Omega)(10\text{ M}\Omega)}{11\text{ M}\Omega} = 909.09\text{ k}\Omega$$

El voltaje medido en realidad es

$$V_2 = \left(\frac{R_2 \| R_M}{R_1 + R_2 \| R_M}\right)V_S = \left(\frac{909.09\text{ k}\Omega}{2.709\text{ M}\Omega}\right)15\text{ V} = 5.034\text{ V}$$

El efecto de carga del voltímetro reduce el voltaje en una cantidad notable. Como se puede ver, mientras más alta es la resistencia entre la cual se mide el voltaje, más grande es el efecto de carga.

Problema relacionado En la figura 7-37(c), calcule el voltaje entre los extremos de R_2 si la resistencia del medidor es de 20 MΩ.

REPASO DE LA SECCIÓN 7-4

1. **Explique por qué un voltímetro puede, potencialmente, cargar un circuito.**
2. **Si usted utiliza un voltímetro con resistencia interna de 10 MΩ para medir voltaje entre los extremos de un resistor de 1 KΩ, ¿normalmente deberá preocuparle el efecto de carga?**
3. **Si un voltímetro con resistencia de 10 MΩ está midiendo el voltaje entre los extremos de un resistor de 3.3 MΩ, ¿deberá preocuparle el efecto de carga?**

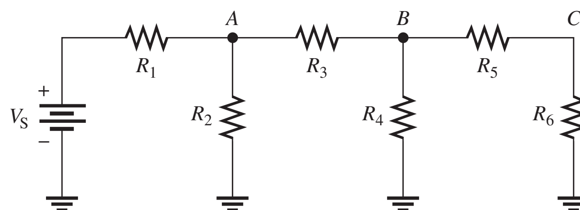
7–5 REDES EN ESCALERA

Una red resistiva en escalera es un tipo especial de circuito en serie-paralelo. La red en escalera $R/2R$ se utiliza comúnmente para reducir voltajes a ciertos valores ponderados para conversión de digital a analógica, lo cual es un proceso que se estudiará en otro curso.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar redes en escalera**
  - Determinar los voltajes en una red en escalera de tres escalones
  - Analizar una escalera $R/2R$

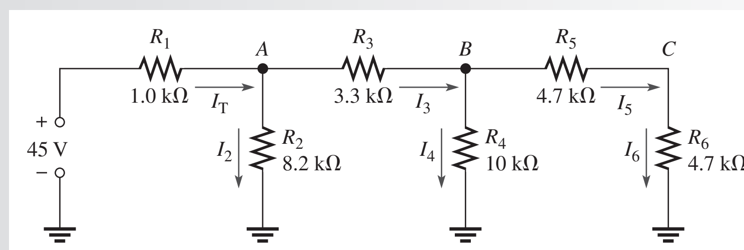
Un método para abordar el análisis de una red en escalera, tal como la mostrada en la figura 7-38, es simplificar escalón por escalón, comenzando en el lado más alejado de la fuente. De este modo, se puede determinar la corriente en cualquier rama o el voltaje en cualquier nodo, como ilustra el ejemplo 7-16.



▲ **FIGURA 7–38**

Red en escalera básica de tres escalones.

EJEMPLO 7–16 En la red en escalera de la figura 7-39, determine la corriente a través de cada resistor y el voltaje en cada nodo marcado con respecto a tierra.



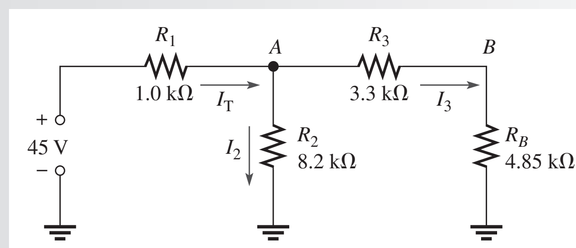
▲ **FIGURA 7–39**

Solución Para encontrar la corriente a través de cada resistor, se debe conocer la corriente total (I_T) producida por la fuente. Para obtener I_T, debe encontrarse la resistencia total “vista” por la fuente.

Determine R_T paso a paso, comenzando por el lado derecho del diagrama de circuito. Primero, observe que R_5 y R_6 están en serie entre los extremos de R_4. Omitiendo el circuito localizado a la izquierda del nodo B, la resistencia del nodo B a tierra es

$$R_B = \frac{R_4(R_5 + R_6)}{R_4 + (R_5 + R_6)} = \frac{(10\text{ k}\Omega)(9.4\text{ k}\Omega)}{19.4\text{ k}\Omega} = 4.85\text{ k}\Omega$$

Utilizando R_B, se puede trazar el circuito equivalente como indica la figura 7-40.

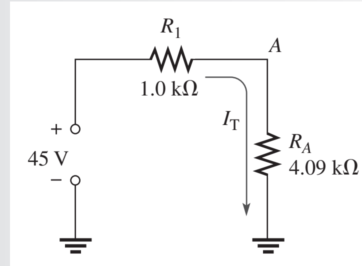


▲ **FIGURA 7–40**

A continuación, haciendo caso omiso del circuito localizado a la izquierda del nodo A, la resistencia de éste a tierra (R_A) es R_2 en paralelo con la combinación en serie de R_3 y R_B. Calcule la resistencia R_A.

$$R_A = \frac{R_2(R_3 + R_B)}{R_2 + (R_3 + R_B)} = \frac{(8.2\ \text{k}\Omega)(8.15\ \text{k}\Omega)}{16.35\ \text{k}\Omega} = 4.09\ \text{k}\Omega$$

Utilizando R_A, es posible simplificar más el circuito equivalente de la figura 7-40 como se muestra en la figura 7-41.



▲ FIGURA 7–41

Por último, la resistencia total "vista" por la fuente es R_1 en serie con R_A.

$$R_T = R_1 + R_A = 1.0\ \text{k}\Omega + 4.09\ \text{k}\Omega = 5.09\ \text{k}\Omega$$

La corriente total del circuito es

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{45\ \text{V}}{5.09\ \text{k}\Omega} = \mathbf{8.84\ mA}$$

Como se indica en la figura 7-40, I_T entra en el nodo A y se divide entre R_2 y la rama que contiene $R_3 + R_B$. Como las resistencias de las ramas son aproximadamente iguales en este ejemplo en particular, la mitad de la corriente total circula por R_2 y la otra mitad entra en el nodo B. Por tanto, las corrientes a través de R_2 y R_3 son

$$I_2 = \mathbf{4.42\ mA}$$
$$I_3 = \mathbf{4.42\ mA}$$

Si las resistencias de rama no son iguales, use la fórmula del divisor de corriente. Como se indica en la figura 7-39, I_3 se dirige al nodo B y se divide entre R_4 y la rama que contiene a $R_5 + R_6$. Por consiguiente, se pueden calcular las corrientes que circulan a través de R_4, R_5 y R_6.

$$I_4 = \left(\frac{R_5 + R_6}{R_4 + (R_5 + R_6)}\right)I_3 = \left(\frac{9.4\ \text{k}\Omega}{19.4\ \text{k}\Omega}\right)4.42\ \text{mA} = \mathbf{2.14\ mA}$$

$$I_5 = I_6 = I_3 - I_4 = 4.42\ \text{mA} - 2.14\ \text{mA} = \mathbf{2.28\ mA}$$

Para determinar V_A, V_B y V_C, aplique la ley de Ohm.

$$V_A = I_2R_2 = (4.42\ \text{mA})(8.2\ \text{k}\Omega) = \mathbf{36.2\ V}$$
$$V_B = I_4R_4 = (2.14\ \text{mA})(10\ \text{k}\Omega) = \mathbf{21.4\ V}$$
$$V_C = I_6R_6 = (2.28\ \text{mA})(4.7\ \text{k}\Omega) = \mathbf{10.7\ V}$$

Problema relacionado Calcule de nuevo las corrientes a través de cada resistor y los voltajes en cada nodo de la figura 7-39 si R_1 se incrementa a 2.2 kΩ.



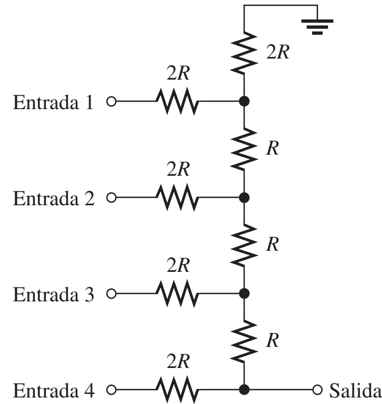
Use el archivo Multisim E07-16 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

La red *R*/2*R* en escalera

En la figura 7-42 se muestra una red básica *R*/2*R* en escalera. Como se puede advertir, el nombre se deriva de la relación de los valores de resistor. *R* representa un valor común, y un conjunto de resistores tiene dos veces el valor de los otros. Este tipo de red en escalera se utiliza en aplicaciones donde códigos digitales se convierten en voz, música, u otros tipos de señales analógicas como, por ejemplo, en el área de grabación y reproducción digitales. Esta aplicación se llama *conversión digital a analógica* (*D*/*A*).

▶ **FIGURA 7–42**

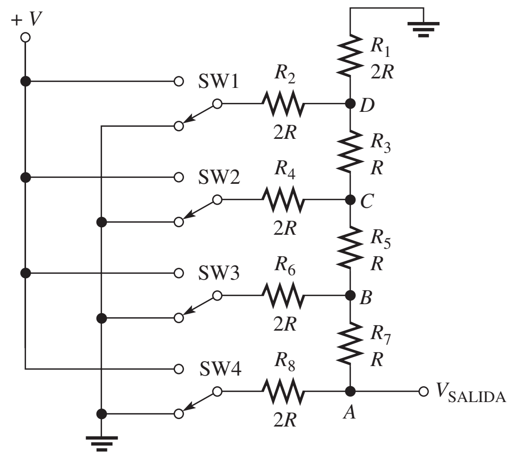
Red en escalera *R*/2*R* básica de cuatro escalones.



A continuación examinamos la operación general de un red *R*/2*R* en escalera utilizando el circuito de cuatro escalones mostrado en la figura 7-43. En un curso posterior de fundamentos digitales, se aprenderá específicamente cómo se utiliza este tipo de circuito en la conversión D/A.

▶ **FIGURA 7–43**

Escalera *R*/2*R* con entradas de interruptor para simular un código (digital) de dos niveles.



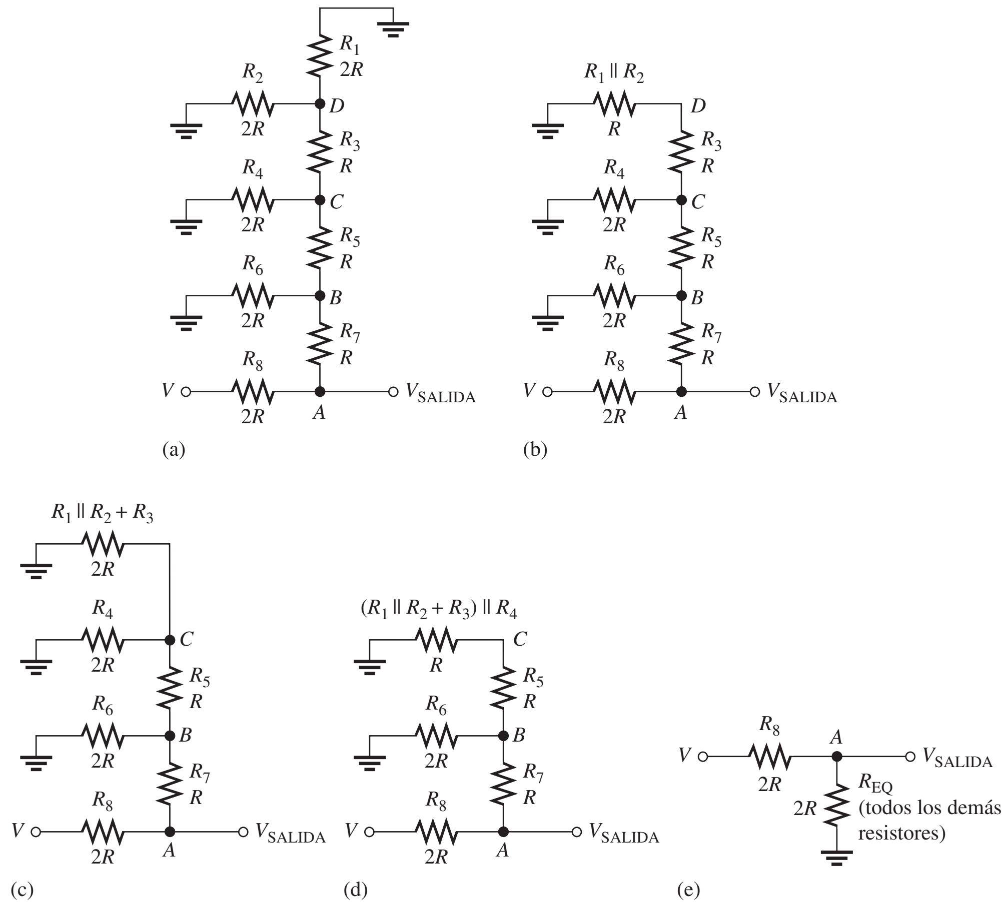
Los interruptores utilizados en esta ilustración simulan las entradas digitales (de dos niveles). Una posición del interruptor se conecta a tierra (0 V) y la otra a un voltaje positivo (*V*). El análisis es como sigue: se inicia suponiendo que, en la figura 7-43, el interruptor SW4 está en la posición *V* y los demás interruptores están en tierra, de modo que las entradas son las mostradas en la figura 7-44(a).

La resistencia total del nodo *A* a tierra se encuentra combinando primero R_1 y R_2 en paralelo del nodo *D* a tierra. El circuito simplificado se muestra en la figura 7-44(b).

$$R_1 \| R_2 = \frac{2R}{2} = R$$

$R_1 \| R_2$ está en serie con R_3 del nodo *C* a tierra como se ilustra en la parte (c).

$$R_1 \| R_2 + R_3 = R + R = 2R$$



▲ **FIGURA 7–44**

Simplificación de la escalera $R/2R$ para su análisis.

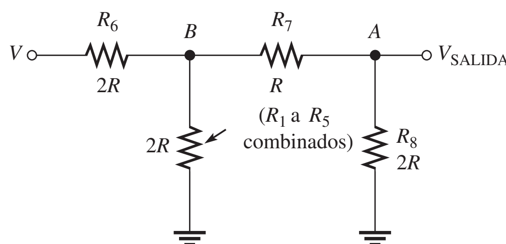
A continuación, esta combinación está en paralelo con R_4 desde el nodo C hasta tierra como indica la parte (d).

$$(R_1 \| R_2 + R_3) \| R_4 = 2R \| 2R = \frac{2R}{2} = R$$

Al continuar con este proceso de simplificación se llega al circuito de la parte (e), donde el voltaje de salida se expresa utilizando la fórmula del divisor de voltaje como

$$V_{SALIDA} = \left(\frac{2R}{4R}\right)V = \frac{V}{2}$$

Un análisis similar, excepto porque el interruptor SW3 de la figura 7-43 se conecta a V y los demás interruptores están conectados a tierra, resulta en el circuito simplificado que muestra la figura 7-45.



◀ **FIGURA 7–45**

Escalera simplificada con sólo una entrada V en SW3 en la figura 7-43.

El análisis en este caso es como sigue: la resistencia del nodo B a tierra es

$$R_B = (R_7 + R_8)\|2R = 3R\|2R = \frac{6R}{5}$$

Al emplear la fórmula del divisor de voltaje, el voltaje en el nodo B con respecto a tierra se expresa como

$$V_B = \left(\frac{R_B}{R_6 + R_B}\right)V = \left(\frac{6R/5}{2R + 6R/5}\right)V = \left(\frac{6R/5}{10R/5 + 6R/5}\right)V = \left(\frac{6R/5}{16R/5}\right)V$$
$$= \left(\frac{6R}{16R}\right)V = \frac{3V}{8}$$

El voltaje de salida es, por consiguiente,

$$V_{\text{SALIDA}} = \left(\frac{R_8}{R_7 + R_8}\right)V_B = \left(\frac{2R}{3R}\right)\left(\frac{3V}{8}\right) = \frac{V}{4}$$

Advierta que en este caso el voltaje de salida ($V/4$) es la mitad del voltaje de salida $V/2$) cuando V está conectado en el interruptor SW4.

Un análisis similar para cada una de las entradas de interruptor restantes en la figura 7-43 produce voltajes de salida como sigue: con SW2 conectado a V y los demás interruptores conectados a tierra,

$$V_{\text{SALIDA}} = \frac{V}{8}$$

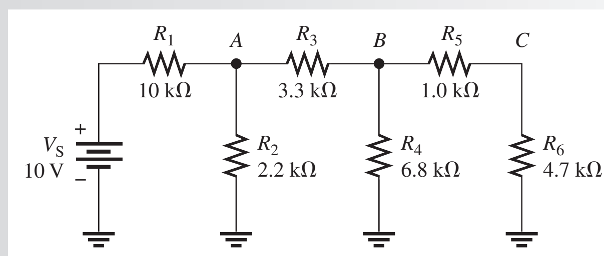
Con SW1 conectado a V y los demás interruptores conectados a tierra,

$$V_{\text{SALIDA}} = \frac{V}{16}$$

Cuando, en un momento dado, más de una entrada está conectada a V, la salida total es la suma de las salidas individuales, de acuerdo con el teorema de superposición que se aborda en la sección 8-4. Estas relaciones particulares entre los voltajes de salida para los diversos niveles de entrada son importantes en la aplicación de redes $R/2R$ en escalera a la conversión digital a analógica.

REPASO DE LA SECCIÓN 7-5

1. Trace una red básica en escalera de cuatro escalones.
2. Determine la resistencia total que hay en el circuito y es presentada a la fuente por la red en escalera de la figura 7-46.
3. ¿Cuál es la corriente total en la figura 7-46?
4. ¿Cuál es la corriente a través de R_2 en la figura 7-46?
5. ¿Cuál es el voltaje en el nodo A con respecto a tierra en la figura 7-46?



▲ FIGURA 7–46

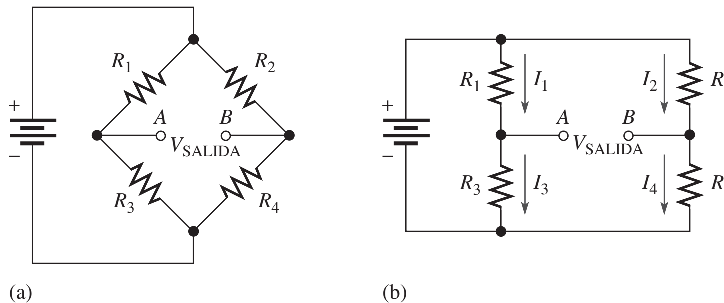
7–6 EL PUENTE WHEATSTONE

El circuito puente Wheatstone se utiliza para medir con precisión la resistencia. Sin embargo, más comúnmente se opera junto con transductores para medir cantidades físicas tales como deformación, temperatura, y presión. Los transductores son dispositivos que detectan el cambio de un parámetro físico y lo convierten en una cantidad eléctrica, tal como un cambio de resistencia. Por ejemplo, un medidor de deformación exhibe un cambio de resistencia cuando se expone a factores mecánicos tales como fuerza, presión o desplazamiento. Un termistor exhibe un cambio de resistencia cuando se expone a un cambio de temperatura. El puente Wheatstone puede ser operado en una condición equilibrada o desequilibrada. Ésta depende del tipo de aplicación.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar y aplicar un puente Wheatstone**
  - Determinar cuándo está equilibrado un puente
  - Determinar una resistencia desconocida con un puente equilibrado
  - Determinar cuándo está desequilibrado un puente
  - Analizar mediciones realizadas con un puente desequilibrado

En la figura 7-47(a) se muestra un circuito **puente Wheatstone** en su configuración "diamante" más común. Se compone de cuatro resistores y una fuente de voltaje de cd entre los puntos superior e inferior del "diamante". El voltaje de salida se toma entre los puntos izquierdo y derecho del "diamante" entre *A* y *B*. En la parte (b), el circuito se traza en una forma un poco diferente para mostrar con claridad su configuración en serie-paralelo.



▲ **FIGURA 7–47**

Puente Wheatstone.

El puente Wheatstone equilibrado

El puente Wheatstone que aparece en la figura 7-47 se encuentra en la condición de **puente equilibrado** cuando el voltaje de salida (V_{SALIDA}) entre las terminales *A* y *B* es igual a cero.

$$V_{SALIDA} = 0\text{ V}$$

Cuando el puente está equilibrado, los voltajes entre los extremos de R_1 y R_2 son iguales ($V_1 = V_2$) y los voltajes entre los extremos de R_3 y R_4 son iguales ($V_3 = V_4$). Por consiguiente, las relaciones de voltaje se escriben como

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{V_2}{V_4}$$

Sustituyendo V por IR de acuerdo con la ley de Ohm se obtiene

$$\frac{I_1R_1}{I_3R_3} = \frac{I_2R_2}{I_4R_4}$$

Como $I_1 = I_3$ e $I_2 = I_4$, todos los términos de corriente se cancelan, y permanecen las relaciones de resistor.

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

Al resolver para R_1 se obtiene la fórmula siguiente:

$$R_1 = R_3\left(\frac{R_2}{R_4}\right)$$

Esta fórmula permite encontrar el valor del resistor R_1 en función de los demás valores de resistor cuando el puente está equilibrado. También se puede encontrar el valor de cualquier otro resistor del mismo modo.

Utilización del puente Wheatstone equilibrado para encontrar una resistencia desconocida Supongamos que en la figura 7-47 R_1 tiene un valor desconocido, el cual se denomina R_X. Los resistores R_2 y R_4 tienen valores fijos, de tal suerte que su relación R_3/R_4 también tiene un valor fijo. Como R_X puede ser de cualquier valor, R_3 debe ser ajustado para hacer que $R_1/R_3 = R_2/R_4$ con el objeto de crear una condición equilibrada. Por consiguiente, R_3 es un resistor variable, al cual denominamos R_V. Cuando R_X se coloca en el puente, R_V se ajusta hasta que el puente está equilibrado como se indica mediante un voltaje de salida de cero. En ese caso, la resistencia desconocida se encuentra como

Ecuación 7–2

$$R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right)$$

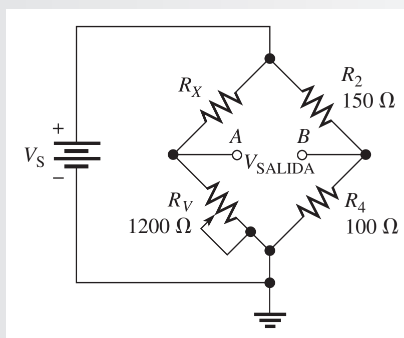
La relación R_2/R_4 es el factor de escala.

Entre las terminales de salida A y B, se puede conectar un tipo más antiguo de instrumento de medición llamado galvanómetro para detectar una condición equilibrada. El galvanómetro es, en esencia, un amperímetro muy sensible que detecta corriente en una u otra dirección. Difiere de un amperímetro regular en que el punto situado a la mitad de la escala es cero. En instrumentos modernos, un amplificador conectado entre la salida del puente indica una condición de equilibrio cuando su salida es de 0 V.

De acuerdo con la ecuación 7-2, el valor de R_V en equilibrio multiplicado por el factor de escala R_2/R_4 es el valor de la resistencia real de R_X. Si $R_2/R_4 = 1$, entonces $R_X = R_V$, si $R_2/R_4 = 0.5$, entonces $R_X = 0.5R_V$, y así sucesivamente. En un circuito puente práctico, la posición del R_V ajustable puede ser calibrada para que indique el valor real de R_X en la escala o con algún otro método de visualización.

EJEMPLO 7–17 Determine el valor de R_X en el puente equilibrado que muestra la figura 7-48.

▶ **FIGURA 7–48**



Solución El factor de escala es

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{150\ \Omega}{100\ \Omega} = 1.5$$

El puente está equilibrado (V_{SALIDA}) = 0 V) cuando R_V se coloca en 1200 Ω, por tanto la resistencia desconocida es

$$R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right) = (1200\ \Omega)(1.5) = \mathbf{1800\ \Omega}$$

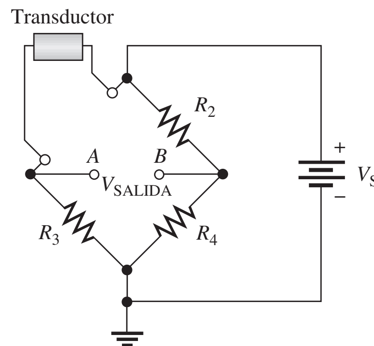
Problema relacionado Si R_V debe ser ajustado a 2.2 kΩ para equilibrar el puente de la figura 7-48, ¿cuál es el valor de R_X?



Use el archivo Multisim E07-17 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

El puente Wheatstone desequilibrado

Ocurre una condición de **puente desequilibrado** cuando V_{SALIDA} no es igual a cero. El puente desequilibrado se utiliza para medir varios tipos de cantidades físicas tales como deformación mecánica, temperatura, o presión. Esto se puede hacer conectando un transductor en una pata del puente como indica la figura 7-49. La resistencia del transductor cambia proporcionalmente a los cambios del parámetro que se está midiendo. Si el puente está equilibrado en un punto conocido, entonces la cantidad de desviación con respecto a la condición de equilibrio, indicada por el voltaje de salida, señala la cantidad de cambio del parámetro que se está midiendo. Por consiguiente, el valor del parámetro que se está midiendo puede ser determinado mediante la cantidad de desequilibrio del puente.



◀ **FIGURA 7–49**

Circuito puente con un transductor incorporado para medir un parámetro físico.

Un circuito puente para medir temperatura Si va a medirse temperatura, el transductor puede ser un termistor, el cual es sensible a la temperatura. La resistencia del termistor cambia de manera predecible a medida que cambia la temperatura. Un cambio de temperatura cambia la resistencia del termistor, lo que provoca un cambio correspondiente en el voltaje de salida del puente a medida que se desequilibra. El voltaje de salida es proporcional a la temperatura; por consiguiente, o un voltímetro conectado entre la salida puede ser calibrado para mostrar la temperatura o el voltaje de salida puede ser amplificado y convertido a forma digital para controlar en pantalla la visualización de la temperatura.

Un circuito puente se diseña para medir temperatura de modo que se equilibre a cierta temperatura de referencia y desequilibre a una temperatura medida. Por ejemplo, suponga que el puente debe equilibrarse a 25°C. Un termistor tendrá un valor conocido de resistencia a 25°C. Por simplicidad, asuma que los otros tres resistores del puente son iguales a la resistencia del termistor a 25°C, por tanto $R_{termistor} = R_2 = R_3 = R_4$. En este caso particular, se puede demostrar que el cam-

bio en el voltaje de salida (ΔV_{SALIDA}) está relacionado con el cambio en $R_{\text{termistor}}$ mediante la siguiente fórmula

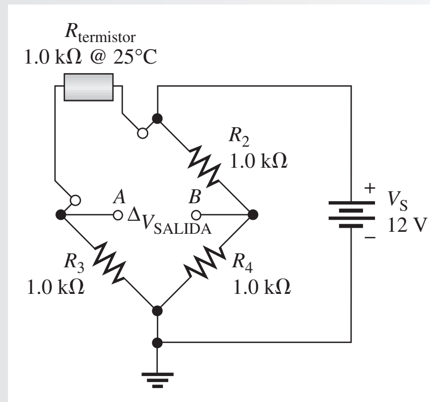
Ecuación 7–3

$$\Delta V_{\text{SALIDA}} \cong \Delta R_{\text{termistor}}\left(\frac{V_S}{4R}\right)$$

La Δ (letra griega delta) en frente de una variable denota un cambio en la variable. Esta fórmula es aplicable sólo al caso en el que todas las resistencias del puente son iguales cuando éste está equilibrado. En el apéndice B se incluye una derivación. Téngase en cuenta que inicialmente el puente puede estar equilibrado sin que todos los resistores sean iguales en tanto $R_1 = R_2$ y $R_3 = R_4$ (vea la figura 7-47), aunque la fórmula para ΔV_{SALIDA} sería más complicada.

EJEMPLO 7–18 Determine el voltaje de salida del circuito puente medidor de temperatura que aparece en la figura 7-50 si el termistor se expone a una temperatura de 50°C y su resistencia a 25°C es de 1.0 kΩ. Suponga que la resistencia del termistor disminuye a 900 Ω a 50°C.

▶ **FIGURA 7–50**



Solución

$$\Delta R_{\text{termistor}} = 1.0\ \text{k}\Omega - 900\ \Omega = 100\ \Omega$$

$$\Delta V_{\text{SALIDA}} \cong \Delta R_{\text{termistor}}\left(\frac{V_S}{4R}\right) = 100\ \Omega\left(\frac{12\ \text{V}}{4\ \text{k}\Omega}\right) = 0.3\ \text{V}$$

Como $V_{\text{SALIDA}} = 0$ V cuando el puente está equilibrado a 25°C y cambia a 0.3 V, entonces

$$V_{\text{SALIDA}} = \mathbf{0.3\ V}$$

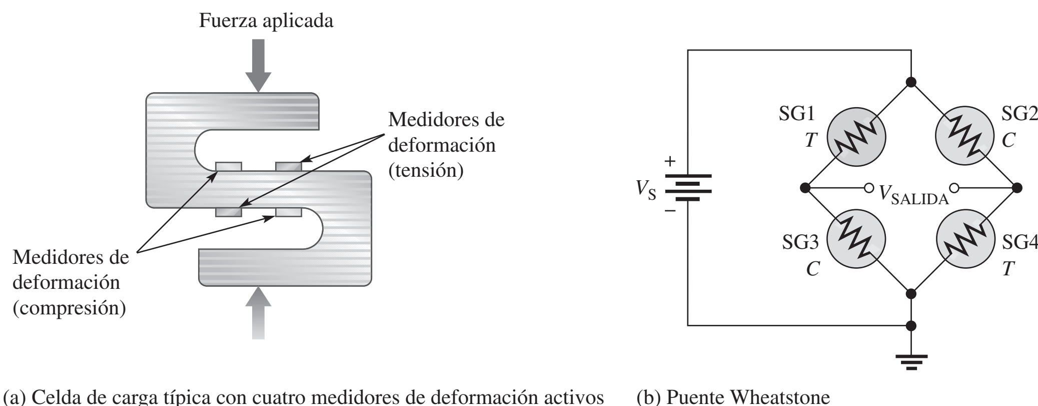
cuando la temperatura es de 50°C.

Problema relacionado Si la temperatura se incrementa a 60°C, con lo que la resistencia del termistor de la figura 7-50 disminuye a 850 Ω, ¿cuál es el valor de V_{SALIDA}?

Otras aplicaciones del puente Wheatstone desequilibrado Se puede utilizar un puente Wheatstone con un medidor de deformación para medir ciertas fuerzas. Un medidor de deformación es un dispositivo que exhibe un cambio de resistencia cuando se comprime o alarga por la aplicación de una fuerza externa. A medida que cambia la resistencia del medidor de deformación, el puente previamente equilibrado se desequilibra. Este desequilibrio provoca que cambie el voltaje de salida a partir de cero, y este cambio puede ser medido para determinar la cantidad de deformación. En medidores de deformación, la resistencia es extremadamente pequeña. Este cambio minúsculo desequilibra un puente Wheatstone debido a su alta sensibilidad. Por ejemplo, comúnmente se utilizan puentes Wheatstone con medidores en básculas de peso.

Algunos transductores resistivos experimentan cambios de resistencia extremadamente pequeños, y estos cambios son difíciles de medir con precisión por medición directa. En particular, los medidores de deformación son uno de los transductores resistivos más útiles que convierten el alargamiento o compresión de un alambre fino en un cambio de resistencia. Cuando la deformación provoca que el alambre instalado en el medidor se alargue, la resistencia se incrementa en una pequeña cantidad; y cuando el alambre se comprime, la resistencia disminuye.

Se utilizan medidores de deformación en muchos tipos de básculas, desde las empleadas para pesar piezas pequeñas hasta aquellas para pesar enormes camiones. En general, los medidores se montan sobre un bloque especial de aluminio que se deforma cuando hay algún peso sobre la báscula. Los medidores de deformación son extremadamente delicados y deben montarse apropiadamente de modo que, en general, todo el ensamble se prepare como una sola unidad llamada celda de carga. Una amplia variedad de celdas de carga de diferentes formas y tamaños está disponible en el mercado, según la aplicación. Una celda típica en forma de S utilizada para pesar y provista de cuatro medidores de deformación se ilustra en la figura 7-51(a). Los medidores se montan de manera que dos de ellos se alarguen (tensión) cuando se coloca una carga sobre la báscula y los otros dos se compriman.



(a) Celda de carga típica con cuatro medidores de deformación activos (b) Puente Wheatstone

▲ **FIGURA 7–51**

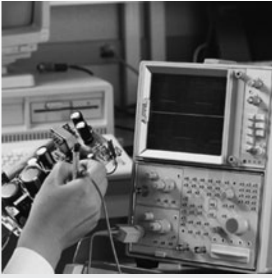
Las celdas de carga casi siempre se conectan a un puente Wheatstone como indica la figura 7-51(b) con medidores de deformación (SG, por sus siglas en inglés) a tensión (*T*) y a compresión (C) en patas diagonales opuestas como se muestra. La salida del puente normalmente se digitaliza y convierte en una lectura que aparece en pantalla o es enviada a una computadora para su procesamiento. La ventaja principal del circuito puente Wheatstone es que es capaz de medir con precisión diferencias de resistencia muy pequeñas. El uso de cuatro transductores activos incrementa la sensibilidad de la medición y hace del puente el circuito ideal para instrumentación. El circuito puente Wheatstone tiene el beneficio agregado de compensar en cuanto a variaciones de temperatura y resistencia de los alambres conectores, que de lo contrario contribuirían a provocar imprecisiones.

Además de en básculas, los medidores de deformación se utilizan con puentes Wheatstone en otros tipos de medición que incluyen mediciones de presión, desplazamiento, y aceleración, por mencionar algunas. En mediciones de presión, los medidores de deformación se pegan a una diafragma flexible que se alarga cuando al transductor se le aplica presión. La cantidad de flexión está relacionada con la presión, la que de nuevo se transforma en un muy pequeño cambio de resistencia.

REPASO DE LA SECCIÓN 7-6

1. Trace un circuito puente Wheatstone básico.
2. ¿En qué condición se equilibra un puente?
3. En la figura 7-48, ¿cuál es la resistencia desconocida cuando $R_V = 3.3\ \text{k}\Omega$, R2 = $10\ \text{k}\Omega$, y $R_4 = 2.2\ \text{k}\Omega$?
4. ¿Cómo se utiliza un puente Wheatstone en la condición desequilibrada?

7–7 Localización de fallas



Como se sabe, la localización de fallas es el proceso de identificar y localizar una falla o un problema en un circuito eléctrico. Algunas técnicas de localización de fallas y la aplicación de razonamiento lógico ya se analizaron en relación tanto con circuitos en serie como con circuitos en paralelo. Una premisa básica de la localización de fallas es que se debe saber qué buscar antes de poder localizar con éxito una falla en un circuito.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

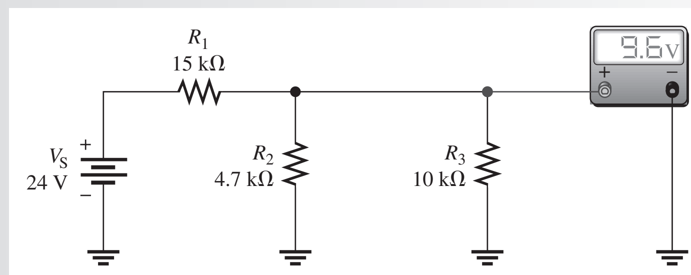
- **Localizar fallas en circuitos en serie-paralelo**
    - Determinar los efectos de una abertura en un circuito
    - Determinar los efectos de un corto en un circuito
    - Localizar aberturas y cortos

Aberturas y cortos son problemas típicos que ocurren en circuitos eléctricos. Como ya se mencionó en el capítulo 5, si un resistor se funde, normalmente producirá una abertura. Las conexiones soldadas defectuosas, los conductores rotos, y los contactos deficientes también pueden ser causas de trayectorias abiertas. Pedazos de material extraño, tales como rebaba de soldadura, aislamiento roto en conductores, etc., con frecuencia pueden conducir a cortos en un circuito. Se considera que un corto es una trayectoria de resistencia cero entre dos puntos.

Además de aberturas o cortos completos, en un circuito se pueden desarrollar aberturas o cortos parciales. Una abertura parcial provoca una resistencia más alta de lo normal, pero no infinitamente grande. Un corto parcial produce una resistencia más baja de lo normal, pero no de cero.

Los tres ejemplos siguientes ilustran la localización de fallas en circuitos en serie-paralelo.

EJEMPLO 7–19 Con la lectura del voltímetro indicada en la figura 7-52, determine si hay una falla aplicando el método APM. Si la hay identifíquela como un corto o una abertura.



▲ FIGURA 7–52

Solución **Paso 1:** Análisis

Determine qué debería estar indicando el voltímetro como sigue. Como R_2 y R_3 están en paralelo, su resistencia combinada es

$$R_{2\|3} = \frac{R_2R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(4.7\text{ k}\Omega)(10\text{ k}\Omega)}{14.7\text{ k}\Omega} = 3.20\text{ k}\Omega$$

Determine el voltaje entre los extremos de la combinación en paralelo por medio de la fórmula del divisor de voltaje.

$$V_{2\|3} = \left(\frac{R_{2\|3}}{R_1 + R_{2\|3}}\right)V_S = \left(\frac{3.2\text{ k}\Omega}{18.2\text{ k}\Omega}\right)24\text{ V} = 4.22\text{ V}$$

Este cálculo muestra que 4.22 V es la lectura que se deberá tener en el medidor. No obstante, éste lee 9.6 V entre los extremos de $R_{2\|3}$. Este valor es incorrecto, y, como es más alto de lo que debería ser, o R_2 o R_3 está probablemente abierto. ¿Por qué? Porque si cualquiera de estos dos resistores está abierto, la resistencia entre la cual el medidor está conectado es más grande de lo esperado. Una resistencia más alta provocará caídas de voltaje más altas en este circuito.

Paso 2: Planificación

Comience tratando de localizar el resistor abierto suponiendo que R_2 está abierto. Si lo está, el voltaje entre los extremos de R_3 es

$$V_3 = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3}\right)V_S = \left(\frac{10\text{ k}\Omega}{25\text{ k}\Omega}\right)24\text{ V} = 9.6\text{ V}$$

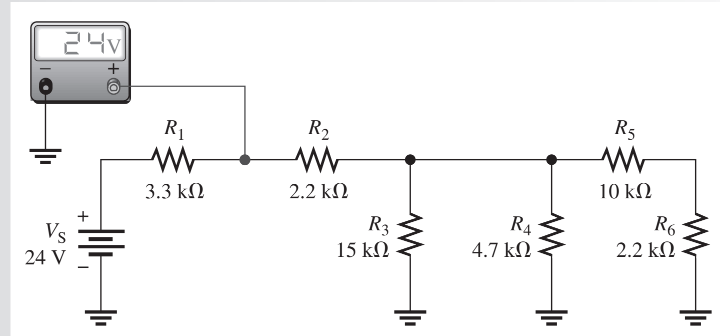
Como el voltaje medido también es de 9.6 V, este cálculo indica que probablemente R_2 está abierto.

Paso 3: Medición

Desconecte la potencia y retire R_2. Mida su resistencia para verificar si está abierto. Si no lo está, examine el alambrado, la soldadura o las conexiones alrededor de R_2, en busca de la abertura.

Problema relacionado En la figura 7-52, ¿cuál sería la lectura del voltímetro si R_3 estuviera abierto? ¿Si R_1 estuviera abierto?

EJEMPLO 7–20 Suponga que lee 24 V con el voltímetro de la figura 7-53. Determine si existe una falla, y, si existe, identifíquela.



▲ FIGURA 7–53

Solución **Paso 1:** Análisis

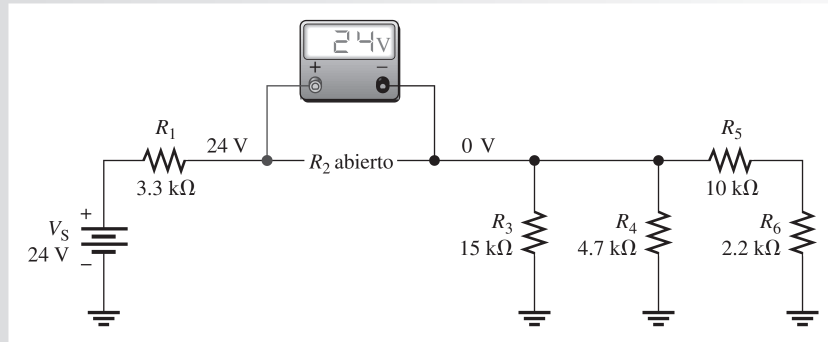
No hay caída de voltaje entre los extremos de R_1 porque ambos lados del resistor están a +24 V. O no existe corriente a través de R_1 proveniente de la fuente, lo cual indica que R_2 está abierto en el circuito, o R_1 está en cortocircuito.

Paso 2: Planificación

La falla más probable es un R_2 abierto. Si está abierto, entonces no habrá corriente proveniente de la fuente. Para verificarlo, mida entre los extremos de R_2 con el voltímetro. Si R_2 está abierto, el medidor indicará 24 V. El lado derecho de R_2 estará a cero volts porque no hay corriente a través de cualquiera de los demás resistores que provoque una caída de voltaje en ellos.

Paso 3: Medición

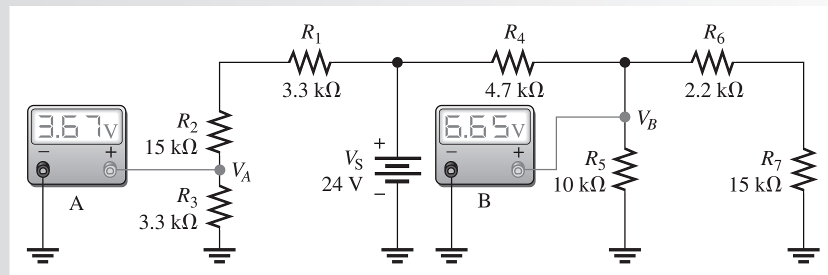
La medición para verificar si R_2 está abierto se muestra en la figura 7-54.



▲ **FIGURA 7–54**

Problema relacionado ¿Cuál sería el voltaje entre los extremos de R_5 abierto suponiendo que no hay otras fallas en la figura 7-53?

EJEMPLO 7–21 Los dos voltímetros de la figura 7-55 indican los voltajes mostrados. Aplique un razonamiento lógico y sus conocimientos de la operación de circuitos para determinar si hay aberturas o cortos en el circuito y, si los hay, dónde se localizan.



▲ **FIGURA 7–55**

Solución **Paso 1:** Determine si las lecturas del voltímetro son correctas. R_1, R_2 y R_3 actúan como un divisor de voltaje. Calcule el voltaje (V_A) entre los extremos de R_3 como sigue:

$$V_A = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S = \left(\frac{3.3\text{ k}\Omega}{21.6\text{ k}\Omega}\right)24\text{ V} = 3.67\text{ V}$$

La lectura del voltímetro A es correcta. Esto indica que R_1, R_2 y R_3 están conectados y que no están defectuosos.

Paso 2. Vea si la lectura del voltímetro B es correcta. $R_6 + R_7$ están en paralelo con R_5. La combinación en serie-paralelo de R_5, R_6 y R_7 está en serie con R_4. Calcule la resistencia de la combinación R_5, R_6 y R_7 como sigue:

$$R_{5\|(6+7)} = \frac{R_5(R_6 + R_7)}{R_5 + R_6 + R_7} = \frac{(10\text{ k}\Omega)(17.2\text{ k}\Omega)}{27.2\text{ k}\Omega} = 6.32\text{ k}\Omega$$

$R_{5\|(6+7)}$ y R_4 forman un divisor de voltaje, y el voltímetro B mide el voltaje entre los extremos de $R_{5\|(6+7)}$. ¿Es correcto? Compruébelo como sigue:

$$V_B = \left(\frac{R_{5\|(6+7)}}{R_4 + R_{5\|(6+7)}}\right)V_S = \left(\frac{6.32\text{ k}\Omega}{11\text{ k}\Omega}\right)24\text{ V} = 13.8\text{ V}$$

Por tanto, el voltaje real medido (6.65 V) en este punto es incorrecto. Un poco de razonamiento lógico ayudará a aislar el problema.

Paso 3: R_4 no está abierto, porque si estuviera, el medidor leería 0 V. Si hubiera un corto entre sus extremos, el medidor leería 24 V. Como el voltaje real es mucho menor de lo que debería ser, $R_{5\|(6+7)}$ debe ser menor que el valor calculado de 6.32 kΩ. El problema más probable es un corto en R_7. Si existe un corto desde el extremo superior de R_7 hasta tierra, R_6 efectivamente está en paralelo con R_5. En este caso,

$$R_5 \| R_6 = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6} = \frac{(10\text{ k}\Omega)(2.2\text{ k}\Omega)}{12.2\text{ k}\Omega} = 1.80\text{ k}\Omega$$

Entonces V_B es

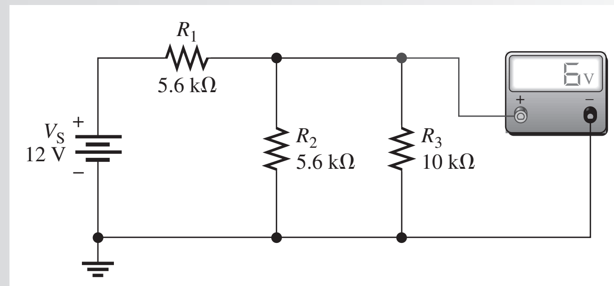
$$V_B = \left(\frac{1.80\text{ k}\Omega}{6.5\text{ k}\Omega}\right)24\text{ V} = 6.65\text{ V}$$

Este valor de V_B concuerda con la lectura del voltímetro B. Así que hay un corto entre los extremos de R_7. Si este fuera un circuito real, usted trataría de determinar la causa física del corto.

Problema relacionado Si en la figura 7-55 la única falla es que R_2 está en cortocircuito, ¿qué leerá el voltímetro A? ¿Qué leerá el voltímetro B?

REPASO DE LA SECCIÓN 7-7

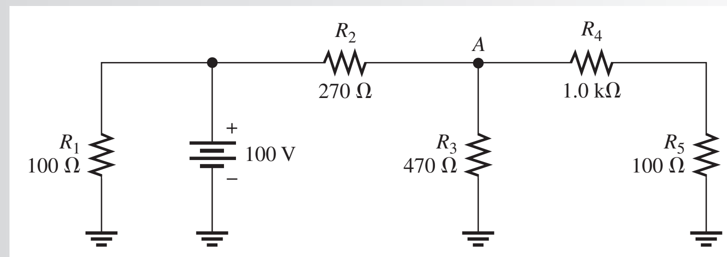
1. Nombre dos tipos comunes de fallas en circuitos eléctricos.
2. En la figura 7-56, uno de los resistores del circuito está abierto. Con base en la lectura del medidor, determine cuál es el resistor abierto.



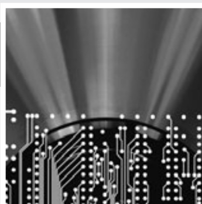
▲ FIGURA 7–56

3. Para las fallas que aparecen en la figura 7-57, ¿qué voltaje se mediría en el nodo A con respecto a tierra?

   (a) Ninguna falla **(b)** R_1 abierto **(c)** Cortocircuito en R_5 **(d)** R_3 y R_4 abiertos **(e)** R_2 abierto



▲ FIGURA 7–57



Una aplicación de circuito

El puente Wheatstone se utiliza mucho en aplicaciones de medición que emplean sensores para convertir un parámetro físico en un cambio de resistencia. Los puentes Wheatstone modernos son automáticos; mediante módulos de interfaz inteligentes, la salida puede ser condicionada y convertida en cualquier unidad deseada para verla en una pantalla o procesarla (por ejemplo, la salida podría aparecer en pantalla en libras si la aplicación es de báscula).

El puente Wheatstone proporciona una medición nula, ello le permite tener una gran sensibilidad. También puede ser diseñado para compensar en cuanto a cambios de temperatura, lo que representa una gran ventaja en muchas mediciones resistivas, en particular cuando el cambio de resistencia del sensor es muy pequeño. Casi siempre, el voltaje de salida del puente es incrementado mediante un amplificador que tiene un efecto de carga mínimo en el puente.

Controlador de temperatura

En esta aplicación, un circuito puente Wheatstone se utiliza en un controlador de temperatura. El sensor es un termistor (“resistor térmico”), el cual es un sensor resistivo que cambia de resistencia con los cambios de temperatura. En el mercado están disponibles termistores con características de resistencia positiva o negativa en función de la temperatura. En este circuito, el termistor es uno de los resistores del puente Wheatstone localizado a corta distancia de la tarjeta de circuito para detectar la temperatura en un punto situado fuera de la tarjeta.

El voltaje de umbral para que la salida cambie es controlado por el potenciómetro de 10 kΩ, R_3. En este caso el amplificador se construyó con un amplificador operacional (amp-op), el cual es un circuito integrado. El término *amplificador* se utiliza en electrónica para describir un dispositivo que produce una réplica más grande del voltaje o de la corriente de entrada a su salida. El término *ganancia* se refiere a la cantidad de amplificación. El amp-op en este circuito está configurado como *comparador*, el cual se utiliza para comparar el voltaje presente en un lado del puente con el voltaje que hay en el otro lado.

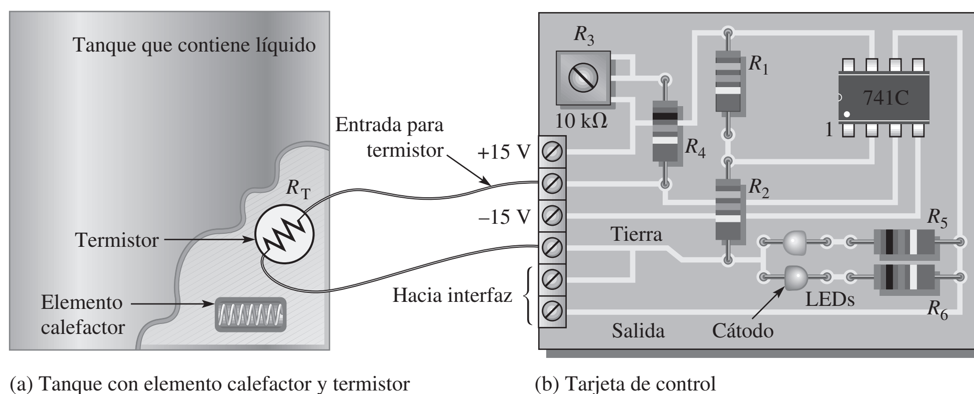
La ventaja de un comparador es que es extremadamente sensible a un puente desequilibrado y produce una gran salida cuando el puente se desequilibra. De hecho, es tan sensible, que resulta virtualmente imposible ajustar el puente para lograr un equilibrio perfecto. Incluso el más pequeño desequilibrio hará que la salida se vaya a un voltaje próximo o al máximo o al mínimo posible (los voltajes de la fuente de potencia). Esto es útil para encender un calentador u otro dispositivo basado en la temperatura.

El circuito de control

Esta aplicación incluye un tanque cuyo contenido líquido tiene que mantenerse caliente, según ilustra la figura 7-58(a). La tarjeta de circuito del controlador de temperatura se muestra en la figura 7-58(b). La tarjeta de circuito controla una unidad calefactora (mediante una interfaz, la cual no se muestra) cuando la temperatura es demasiado fría. El termistor, localizado en el tanque, está conectado entre una de las entradas del amplificador y tierra como se ilustra.

El amplificador es un amplificador operacional 741C, un dispositivo barato y popular que funciona muy bien en este tipo de aplicación. El amp-op tiene dos entradas, una salida, y conexiones para voltajes de suministro positivo y negativo. El símbolo esquemático del amplificador operacional con diodos emisores de luz (LEDs) conectados a la salida se muestra en la figura 7-59. El LED rojo se enciende cuando la salida del amp-op es un voltaje positivo, ello indica que el calentador está encendido. El LED verde se enciende cuando la salida es un voltaje negativo, lo cual indica que el calentador está apagado.

◆ Con la tarjeta de circuito como guía, complete el diagrama esquemático de la figura 7-59. Las entradas al amplificador operacional están conectadas a un puente Wheatstone. Indique los valores de todos los resistores.



(a) Tanque con elemento calefactor y termistor (b) Tarjeta de control

▲ FIGURA 7–58

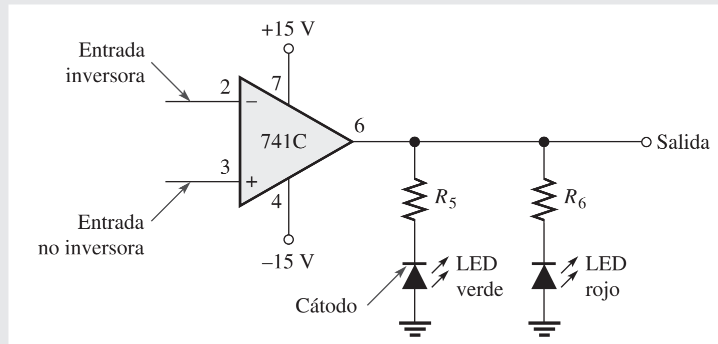


FIGURA 7-59

Amplificador operacional e indicadores LED de salida.

El termistor

El termistor es una mezcla de dos óxidos metálicos, los cuales exhiben un gran cambio de resistencia en función de la temperatura. En el circuito controlador de temperatura, el termistor está localizado fuera de la tarjeta cercano al punto donde se va a detectar la temperatura en el tanque, y está conectado entre la entrada al termistor y tierra.

Los termistores tienen una característica de resistencia-temperatura no lineal descrita mediante la ecuación exponencial:

$$R_T = R_0 e^{\beta\left(\frac{T_0 - T}{T_0 T}\right)}$$

donde:

R_T = la resistencia a una temperatura dada

R_0 = la resistencia a una temperatura de referencia

T_0 = la temperatura de referencia en grados Kelvin (K), típicamente de 298 K, equivalentes a 25°C

T = temperatura en grados Kelvin

β = una constante (K) provista por el fabricante

Esta ecuación exponencial, donde e es la base de los logaritmos naturales, es fácil de resolver con una calculadora científica. Las ecuaciones exponenciales se estudian en capítulos posteriores.

El termistor presentado en esta aplicación es un termistor Thermometrics RL2006-13.3K-140–D1 con resistencia especificada de 25 kΩ a 25°C y β de 4615 K. Por conveniencia, en la figura 7-60 la resistencia del termistor se graficó en función de la temperatura. Observe que la pendiente negativa indica que este termistor tiene un coeficiente de temperatura negativo (CTN); es decir, su resistencia disminuye a medida que se incrementa la temperatura.

Como un ejemplo, se muestra el cálculo para encontrar la resistencia con $T = 50°C$. En primer lugar, convierta 50°C en grados K.

$$T = °C + 273 = 50°C + 273 = 323 \text{ K}$$

Asimismo,

$$T_0 = °C + 273 = 25°C + 273 = 298 \text{ K}$$

$$R_0 = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R_T = R_0 e^{\beta\left(\frac{T_0 - T}{T_0 T}\right)}$$

$$= (25 \text{ k}\Omega) e^{4615\left(\frac{298-323}{298\times 323}\right)}$$

$$= (25 \text{ k}\Omega) e^{-1.198}$$

$$= (25 \text{ k}\Omega)(0.302)$$

$$= 7.54 \text{ k}\Omega$$

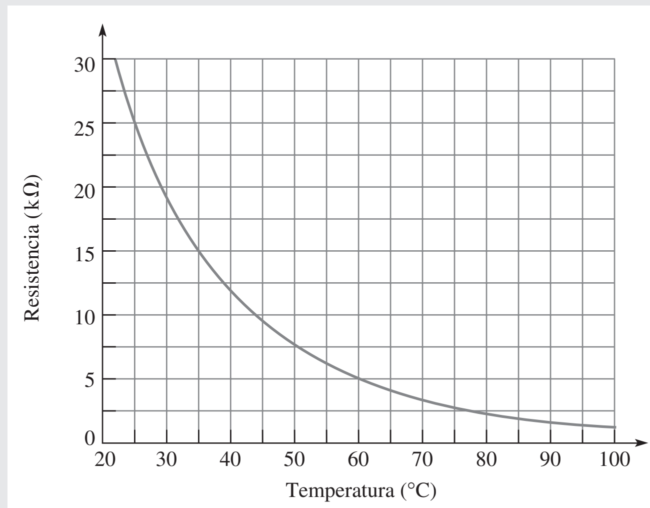


FIGURA 7-60

Con su calculadora, determine primero el valor del exponente $\beta(T_0 - T)/(T_0T)$. En seguida calcule el valor del término $e^{\beta\left(\frac{T_0-T}{T_0T}\right)}$. Por último, multiplique por R_0. En muchas calculadoras, e^x es una función secundaria.

- ◆ Encuentre la resistencia del termistor a una temperatura de 40°C con la ecuación exponencial y confirme que su cálculo es correcto comparando su resultado con la figura 7-60. Recuerde que en la ecuación las temperaturas están en grados Kelvin (K = °C + 273).
- ◆ Calcule el ajuste de resistencia de R_3 para equilibrar el puente a 25°C.
- ◆ Calcule el voltaje de salida del puente (entrada al amp-op) cuando la temperatura del termistor es de 40°C. Suponga que el puente estaba equilibrado a 25°C y que el único cambio es la resistencia del termistor.
- ◆ Si usted necesita ajustar la temperatura de referencia a 0°C, ¿qué cambio simple le haría al circuito? Demuestre con un cálculo que su cambio funcionará y trace el diagrama esquemático revisado.

Repaso

1. A 25°C, el termistor tendrá aproximadamente 7.5 V entre sus extremos. Calcule la potencia que disipa. ¿Existe algún efecto de carga en la medición de temperatura debido a esto?
2. A medida que se incrementa la temperatura, ¿se incrementa o reduce el efecto de carga, o no cambia? Explique su respuesta.
3. ¿Se pueden utilizar resistores de ⅛ W en esta aplicación? Explique su respuesta.
4. ¿Por qué sólo un LED se enciende a la vez a la salida?

RESUMEN

- ◆ Un circuito en serie-paralelo es una combinación de trayectorias tanto en serie como en paralelo.
- ◆ Para determinar la resistencia total en un circuito en serie-paralelo, identifique las relaciones serie y paralelo, y luego aplique las fórmulas para resistencia en serie y resistencia en paralelo de los capítulos 5 y 6.
- ◆ Para encontrar la corriente total, aplique la ley de Ohm y divida el voltaje total entre la resistencia total.
- ◆ Para determinar corrientes de rama, aplique la fórmula del divisor de corriente, la ley de la corriente de Kirchhoff o ley de Ohm. Considere cada problema de circuito individualmente para encontrar el método más apropiado.
- ◆ Para determinar caídas de voltaje entre cualquier parte de un circuito en serie-paralelo, use la fórmula del divisor de voltaje, la ley del voltaje de Kirchhoff o la ley de Ohm. Considere cada problema de circuito individualmente para encontrar el método más apropiado.
- ◆ Cuando se conecta un resistor de carga entre la salida de un divisor de voltaje, el voltaje de salida disminuye.
- ◆ Para que el efecto de carga se reduzca al mínimo, el resistor de carga deberá ser grande comparado con la resistencia entre la cual está conectado.
- ◆ Para determinar la resistencia total de una red en escalera, inicie en el punto más alejado de la fuente y reduzca la resistencia a pasos.
- ◆ Se puede utilizar un puente Wheatstone equilibrado para medir una resistencia desconocida.
- ◆ Un puente está equilibrado cuando el voltaje de salida es de cero. La condición equilibrada produce corriente de cero a través de una carga conectada entre las terminales de salida del puente.
- ◆ Se puede utilizar un puente Wheatstone desequilibrado para medir cantidades físicas por medio de un transductor.
- ◆ Las aberturas y los cortos son fallas típicas de un circuito eléctrico.
- ◆ Al fundirse, los resistores normalmente se abren.

TÉRMINOS CLAVE

Estos términos también se encuentran en el glosario incluido al final del libro.

Corriente remanente Es la corriente que resta luego de que la corriente de carga total es sustraída de la corriente total presente en el circuito.

Puente desequilibrado Circuito puente que está en estado de desequilibrio indicado por un voltaje entre las terminales de salida que es proporcional a la cantidad de desviación con respecto al estado equilibrado.

Puente equilibrado Circuito en configuración de puente cuyo estado de equilibrio es indicado por 0 V entre las terminales de salida.

Puente Wheatstone Circuito puente de 4 patas con el cual se puede medir con precisión una resistencia desconocida utilizando el estado equilibrado. Las desviaciones de resistencia pueden ser medidas con el estado desequilibrado.

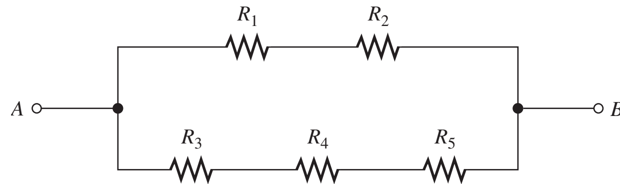
FÓRMULAS

7–1	$I_{REMANENTE} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2}$	Corriente sangradora
7–2	$R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right)$	Resistencia desconocida en un puente Wheatstone
7–3	$\Delta V_{SALIDA} = \Delta R_{termistor}\left(\frac{V_S}{4R}\right)$	Salida de puente con termistor

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. ¿Cuáles de los siguientes enunciados son verdaderos en relación con la figura 7-61?
   (a) R_1 y R_2 están en serie con R_3, R_4 y R_5.
   (b) R_1 y R_2 están en serie.
   (c) R_3, R_4 y R_5 están en paralelo.
   (d) La combinación en serie de R_1 y R_2 está en paralelo con la combinación en serie de R_3, R_4 y R_5.
   (e) respuestas (b) y (d)



▲ FIGURA 7–61

2. La resistencia total de la figura 7-61 puede ser calculada con ¿cuál de las siguientes fórmulas?
   (a) $R_1 + R_2 + R_3\|R_4\|R_5$ (b) $R_1\|R_2 + R_3\|R_4\|R_5$
   (c) $(R_1 + R_2)\|(R_3 + R_4 + R_5)$ (d) ninguna de estas respuestas
3. Si todos los resistores mostrados en la figura 7-61 tienen el mismo valor, cuando se aplica voltaje entre las terminales A y B la corriente es
   (a) máxima en R_5 (b) máxima en R_3, R_4 y R_5
   (c) máxima en R_1 y R_2 (d) la misma en todos los resistores
4. Dos resistores de 1.0 kΩ están en serie, y esta combinación en serie está en paralelo con un resistor de 2.2 kΩ. El voltaje entre los extremos de uno de los resistores de 1.0 kΩ es de 6 V. El voltaje entre los extremos del resistor de 2.2 kΩ es
   (a) 6 V (b) 3 V (c) 12 V (d) 13.2 V
5. La combinación en paralelo de un resistor de 330 Ω y otro de 470 Ω está en serie con la combinación en paralelo de cuatro resistores de 1.0 kΩ. Se conecta una fuente de 100 V entre las terminales del circuito. El resistor con más corriente tiene un valor de
   (a) 1.0 kΩ (b) 330 Ω (c) 470 Ω
6. En el circuito descrito en la pregunta 5, el o los resistores con más voltaje tienen un valor de
   (a) 1.0 kΩ (b) 470 Ω (c) 330 Ω

7. En el circuito de la pregunta 5, el porcentaje de la corriente total que pasa por cualquier resistor de 1.0 kΩ es

(a) 100% **(b)** 25% **(c)** 50% **(d)** 31.3%

8. La salida de cierto divisor de voltaje es de 9 V sin carga. Cuando se conecta una carga, el voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia **(d)** se vuelve de cero

9. Cierto divisor de voltaje se compone de dos resistores de 10 kΩ en serie. ¿Cuál de los siguientes resistores de carga tendrá el máximo efecto en el voltaje de salida?

(a) 1.0 MΩ **(b)** 20 kΩ **(c)** 100 kΩ **(d)** 10 kΩ

10. Cuando se conecta una resistencia de carga a la salida de un circuito divisor de voltaje, la corriente producida por la fuente

(a) disminuye **(b)** aumenta **(b)** no cambia **(b)** se interrumpe

11. En un circuito en escalera, la simplificación deberá comenzar en

(a) la fuente **(b)** el resistor más alejado de la fuente

(c) el centro **(c)** el resistor más cercano a la fuente

12. En cierta red $R/2R$ en escalera de cuatro escalones, el valor de resistor más pequeño es de 10 kΩ. El valor más grande es

(a) indeterminable **(b)** de 20 kΩ **(c)** de 50 kΩ **(d)** de 100 kΩ

13. El voltaje de salida de un puente Wheatstone equilibrado es

(a) igual al voltaje de fuente

(b) igual a cero

(c) depende de todos los valores de resistor presentes en el puente

(d) depende del valor del resistor desconocido

14. Cierto puente Wheatstone tiene los siguientes valores de resistor: $R_V = 8$ kΩ, $R_2 = 680$ Ω, y $R_4 = 2.2$ kΩ. La resistencia desconocida es

(a) 2473 Ω **(b)** 25.9 kΩ **(c)** 187 Ω **(d)** 2890 Ω

15. Usted está midiendo el voltaje en un punto dado de un circuito cuyos valores de resistencia son muy altos y el voltaje medido es un poco más bajo de lo que debiera ser. Esto posiblemente es porque

(a) uno o más de los valores de resistencia están deshabilitados

(b) el efecto de carga del voltímetro

(c) el voltaje de fuente es demasiado bajo

(d) todas estas respuestas

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 7-62(b).

1. Si R_2 se abre, la corriente total

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

2. Si R_3 se abre, la corriente en R_2

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

3. Si R_4 se abre, el voltaje entre sus extremos

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

4. Si R_4 está en cortocircuito, la corriente total

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 7-64.

5. Si R_{10} se abre, con 10 V aplicados entre las terminales A y B, la corriente total

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

6. Si R_1 se abre, con 10 V aplicados entre las terminales A y B, el voltaje entre los extremos de R_1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

7. Si existe un corto entre el contacto izquierdo de R_3 y el contacto inferior de R_5, la resistencia total entre A y B

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 7-68.

8. Si R_4 se abre, el voltaje en el punto C

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

9. Si existe un corto del punto D a tierra, el voltaje de A a B

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

10. Si R_5 se abre, la corriente a través de R_1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 7-74.

11. Si se conecta un resistor de carga de 10 kΩ entre las terminales de salida A y B, el voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

12. Si el resistor de carga de 10 kΩ mencionado en la pregunta 11 es reemplazado por un resistor de carga de 100 kΩ, V_{SALIDA}

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 7-75.

13. Si existe un corto entre las terminales V_2 y V_3 del interruptor, el voltaje V_1 con respecto a tierra

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

14. Si el interruptor está en la posición mostrada y la terminal V_3 del interruptor se pone en cortocircuito a tierra, el voltaje entre los extremos de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

15. Si R_4 se abre con el interruptor en la posición mostrada, el voltaje entre los extremos de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 7-80.

16. Si R_4 se abre, V_{SALIDA}

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

17. Si R_7 se pone en cortocircuito, V_{SALIDA}

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican mediante un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 7–1 Identificación de relaciones en serie-paralelo

1. Visualice y trace las siguientes combinaciones en serie-paralelo:

(a) R_1 en serie con la combinación en paralelo de R_2 y R_3

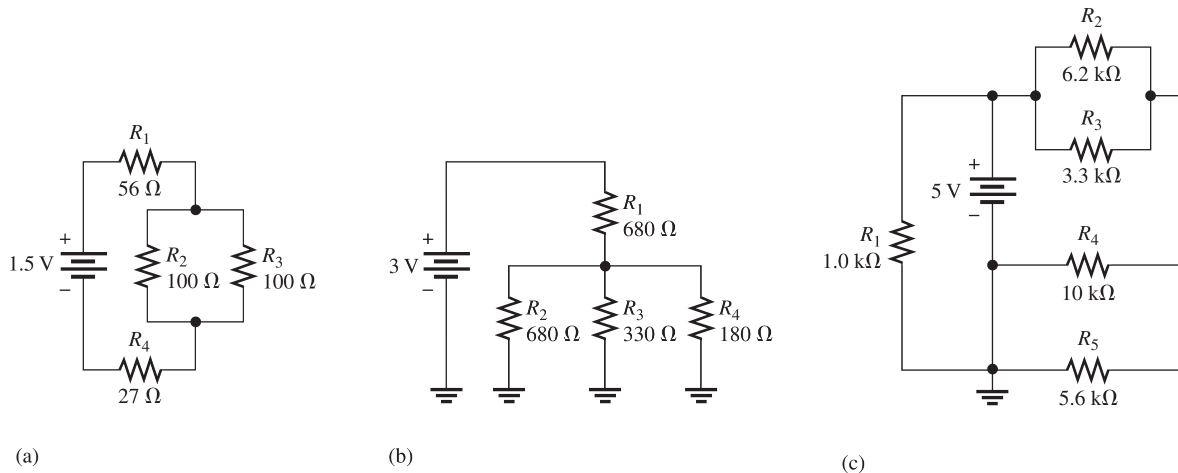
(b) R_1 en paralelo con la combinación en serie de R_2 y R_3

(c) R_1 en paralelo con una rama que contiene R_2 en serie con una combinación en paralelo de otros cuatro resistores

2. Visualice y trace los siguientes circuitos en serie-paralelo:

(a) Una combinación en paralelo de tres ramas, cada rama con dos resistores en serie

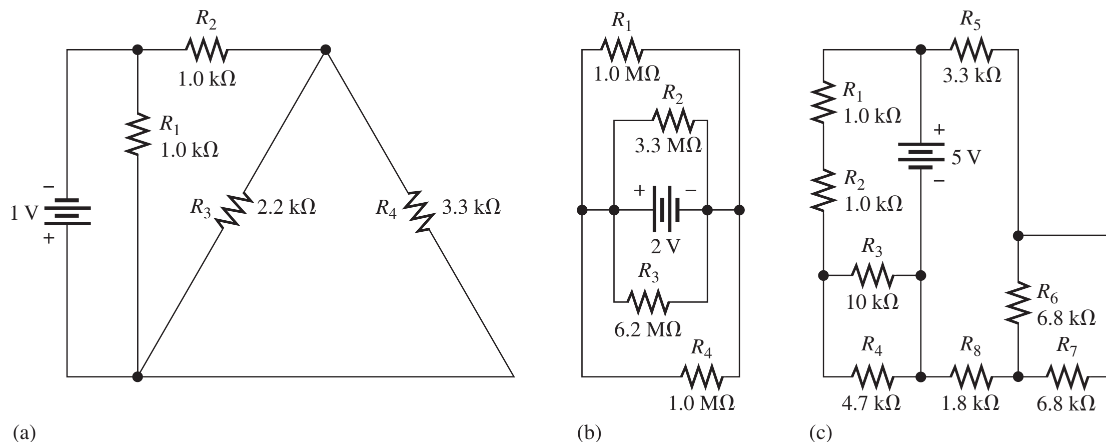
(b) Una combinación serie de tres circuitos en paralelo, cada circuito con dos resistores



▲ FIGURA 7–62

3. En cada circuito de la figura 7-62, identifique las relaciones en serie-paralelo de los resistores vistas desde la fuente.

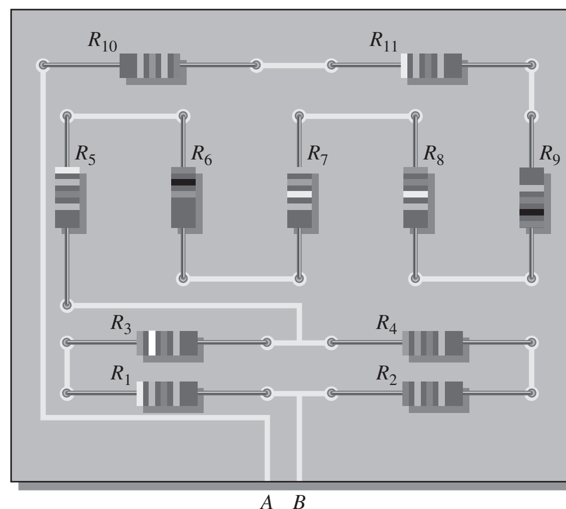
4. En cada uno de los circuitos de la figura 7-63, identifique las relaciones en serie-paralelo de los resistores vistas desde la fuente.



▲ FIGURA 7–63

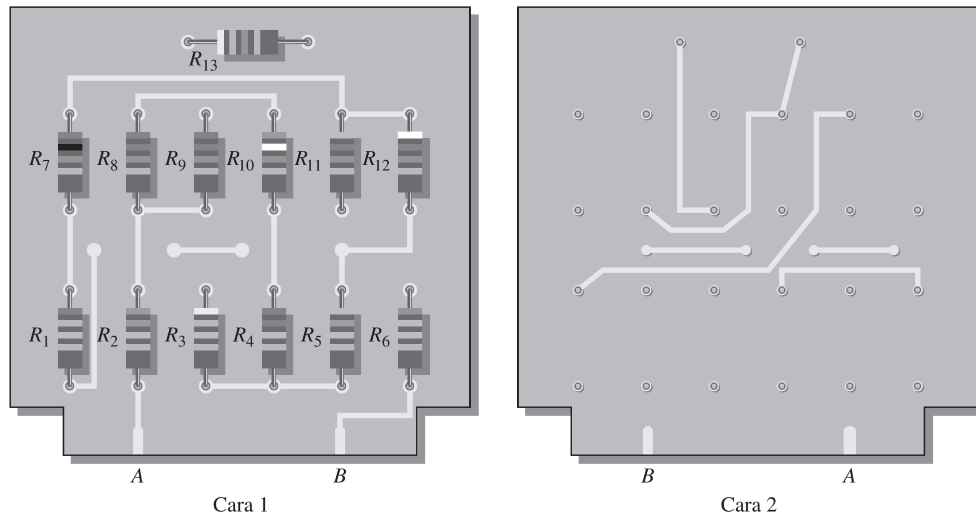
5. Trace el diagrama esquemático de la configuración de la tarjeta de circuito impreso mostrada en la figura 7-64 indicando valores de resistor, e identifique las relaciones en serie-paralelo.

▶ FIGURA 7–64



*6. Desarrolle un diagrama esquemático de la tarjeta de circuito impreso de doble cara mostrada en la figura 7-65, y marque los valores de resistor.

*7. Configure una tarjeta de circuito impreso para el circuito de la figura 7-63(c). La batería tiene que conectarse externa a la tarjeta.



▲ FIGURA 7–65

SECCIÓN 7–2 Análisis de circuitos resistivos en serie-paralelo

8. Un cierto circuito se compone de dos resistores en paralelo. La resistencia total es de 667 Ω. Uno de los resistores es de 1.0 kΩ. ¿Cuál es el otro resistor?

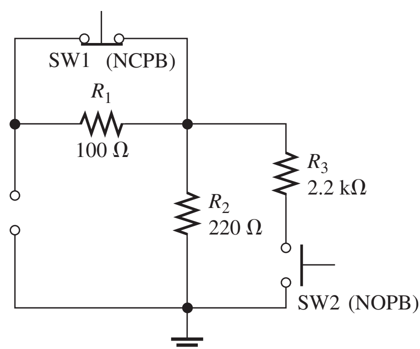
9. Para cada uno de los circuitos mostrados en la figura 7-62, determine la resistencia total presentada a la fuente.

10. Repita el problema 9 para cada uno de los circuitos mostrados en la figura 7-63.

11. Determine la corriente a través de cada resistor del circuito de la figura 7-62; calcule en seguida cada caída de voltaje.

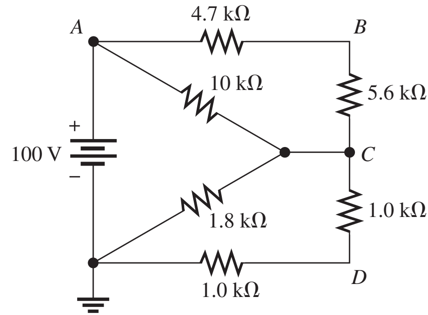
12. Determine la corriente a través de cada resistor en cada circuito de la figura 7-63; luego calcule cada caída de voltaje.

13. Encuentre R_T para todas las combinaciones de los interruptores de la figura 7-66.



▲ FIGURA 7–66

▶ **FIGURA 7–67**



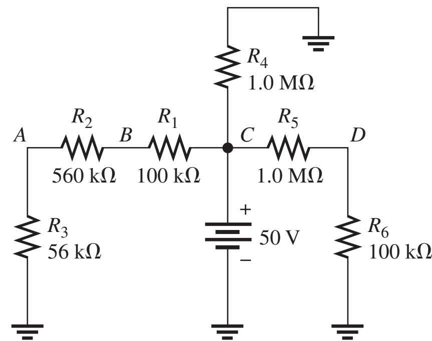
14. Determine la resistencia entre *A* y *B* en la figura 7-67 sin la fuente.

15. Determine el voltaje en cada nodo con respecto a tierra en la figura 7-67.

16. Determine el voltaje en cada nodo con respecto a tierra en la figura 7-68.

17. En la figura 7-68, ¿cómo determinaría el voltaje entre los extremos de R_2 por medición sin conectar directamente un medidor entre los extremos del resistor?

▶ **FIGURA 7–68**

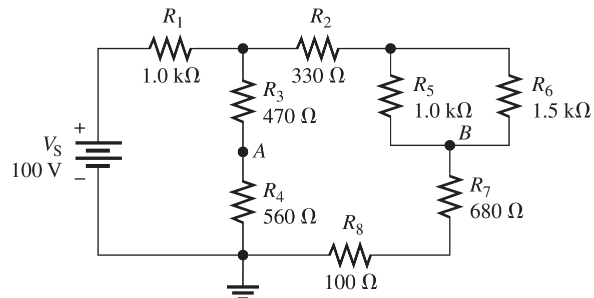


18. Determine la resistencia del circuito mostrado en la figura 7-67 como se ve desde la fuente de voltaje.

19. Determine la resistencia del circuito mostrado en la figura 7-68 como se ve desde la fuente de voltaje.

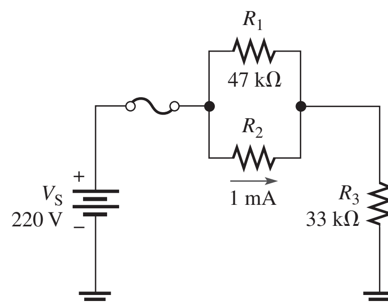
20. Determine el voltaje, V_{AB}, en la figura 7-69.

▶ **FIGURA 7–69**

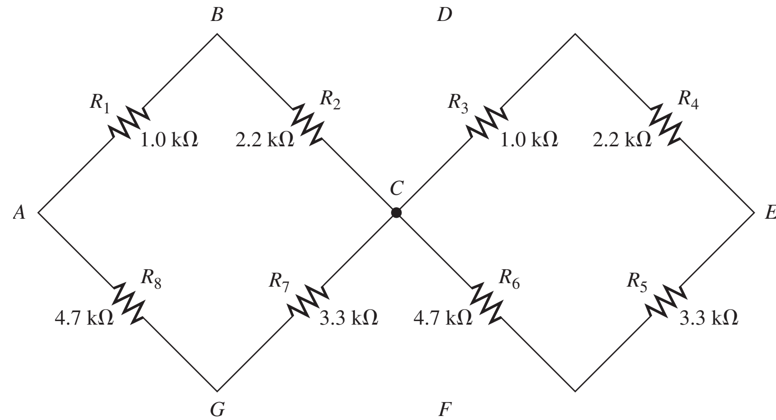


* **21.** (a) Determine el valor de R_2 en la figura 7-70. (b) Encuentre la potencia en R_2.

▶ **FIGURA 7–70**



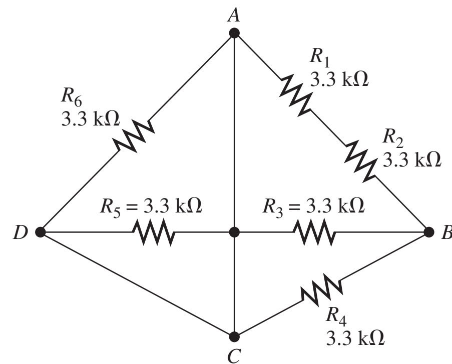
* **22.** En la figura 7-71, determine la resistencia entre el nodo A y cada uno de los demás nodos (R_{AB}, R_{AC}, R_{AD}, R_{AE}, R_{AF}, y R_{AG}).



▲ **FIGURA 7–71**

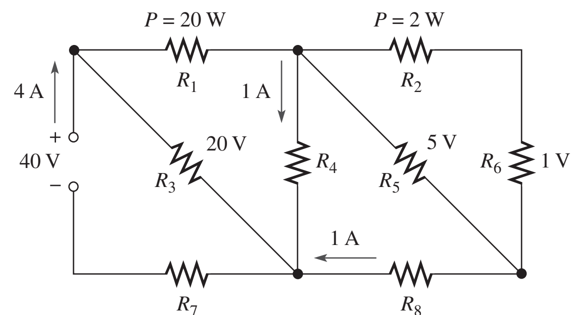
***23.** Encuentre la resistencia entre cada uno de los siguientes juegos de nodos mostrados en la figura 7-72: AB, BC y CD.

▶ **FIGURA 7–72**



* **24.** Determine el valor de cada resistor mostrado en la figura 7-73.

▶ **FIGURA 7–73**



SECCIÓN 7–3 Divisores de voltaje con cargas resistivas

25. Un divisor de voltaje está compuesto por dos resistores de 56 kΩ y una fuente de 15 V. Calcule el voltaje de salida sin carga. ¿Cuál será el voltaje de salida si se conecta un resistor con carga de 1.0 MΩ a la salida?

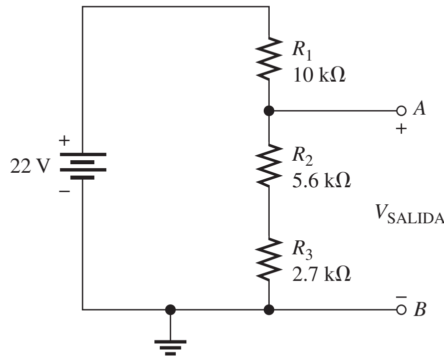
26. La salida de una batería de 12 V se divide para obtener dos voltajes de salida. Se utilizan tres resistores de 3.3 kΩ para proporcionar dos tomas. Determine los voltajes de salida. Si se conecta una carga de 10 kΩ a la más alta de las salidas, ¿cuál será su valor con carga?

27. ¿Cuál de dos cargas, una de 10 kΩ y otra de 47 kΩ, provocará una disminución más pequeña en el voltaje de salida de un divisor de voltaje dado?

28. En la figura 7-74, determine el voltaje de salida sin carga entre las terminales de salida. Con una carga de 100 kΩ conectada de *A* a *B*, ¿cuál es el voltaje de salida?

29. En la figura 7-74, determine el voltaje de salida con una carga de 33 kΩ conectada entre *A* y *B*.

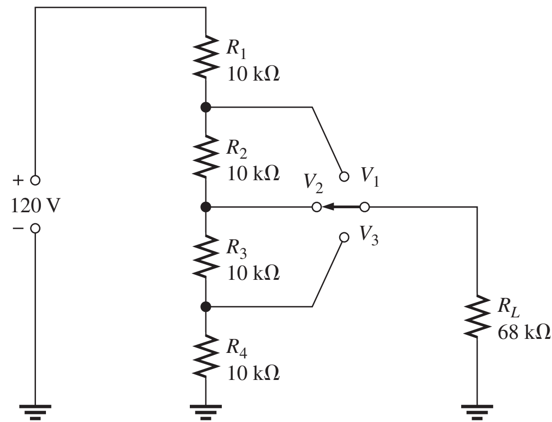
30. En la figura 7-74, determine la corriente continua extraída de la fuente sin carga entre las terminales de salida. Con una carga de 33 kΩ, ¿cuál es la corriente extraída?



▲ **FIGURA 7–74**

***31.** Determine los valores de resistencia para un divisor de voltaje que debe satisfacer las siguientes especificaciones: la corriente extraída de la fuente sin carga no debe exceder de 5 mA; el voltaje de fuente tiene que ser de 10 V, y las salidas requeridas deben ser de 5 y 2.5 V. Trace el circuito. Determine el efecto en los voltajes de salida si se conecta una carga de 1.0 kΩ a cada toma, una a la vez.

32. El divisor de voltaje de la figura 7-75 tiene una carga controlada por interruptor. Determine el voltaje en cada toma (V_1, V_2 y V_3) para cada posición del interruptor.



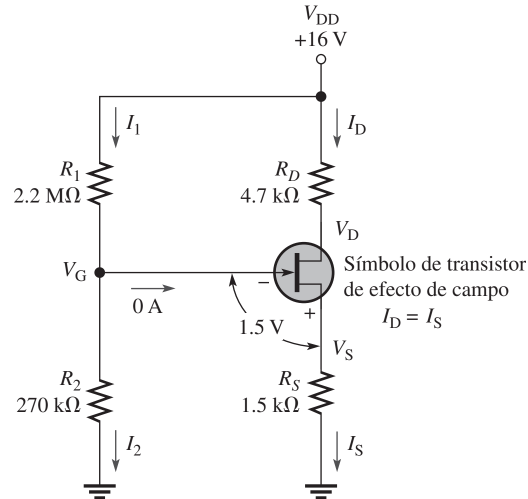
▲ **FIGURA 7–75**

***33.** La figura 7-76 muestra un circuito polarizador de cd para un amplificador de transistor de efecto de campo. La polarización es un método común empleado para establecer ciertos niveles de voltaje de cd para la operación apropiada de un amplificador. Aunque no se espera que usted conozca los amplificadores con transistores en este momento, los voltajes y las corrientes de cd presentes en el circuito pueden ser determinados con métodos ya conocidos.

(a) Encuentre V_G y V_S **(b)** Determine I_1, I_2, I_D, e I_S **(c)** Encuentre V_{DS} y V_{DG}

***34.** Diseñe un divisor de voltaje que produzca una salida de 6 V sin carga y un mínimo de 5.5 V entre los extremos de una carga de 1.0 kΩ. El voltaje de fuente es de 24 V y la corriente extraída sin carga no debe exceder de 100 mA.

▶ FIGURA 7–76



SECCIÓN 7–4 Efecto de carga de un voltímetro

35. ¿En cuál de los siguientes intervalos de voltaje presentará un voltímetro la mínima carga que haya en un circuito?

(a) 1 V **(b)** 10 V **(c)** 100 V **(d)** 1000 V

36. Determine la resistencia interna de un voltímetro de 20,000 Ω/V en cada uno de los siguientes ajustes de intervalo.

(a) 0.5 V **(b)** 1 V **(c)** 5 V **(d)** 50 V **(e)** 100 V **(f)** 1000 V

37. El voltímetro descrito en el problema 36 se utiliza para medir voltaje entre los extremos de R_4 en la figura 7-62(a).

(a) ¿Qué intervalo se deberá utilizar?

(b) ¿En cuánto se reduce el voltaje medido por el medidor con respecto al voltaje real?

38. Repita el problema 37 si se utiliza el voltímetro para medir voltaje entre los extremos de R_4 en el circuito de la figura 7-62(b).

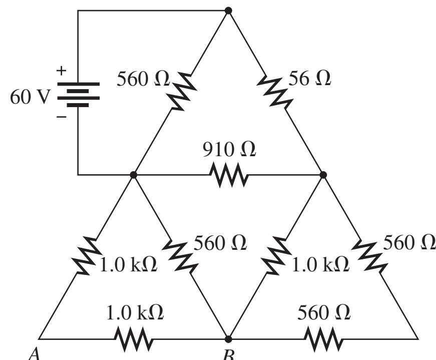
SECCIÓN 7–5 Redes en escalera

39. Para el circuito mostrado en la figura 7-77, calcule:

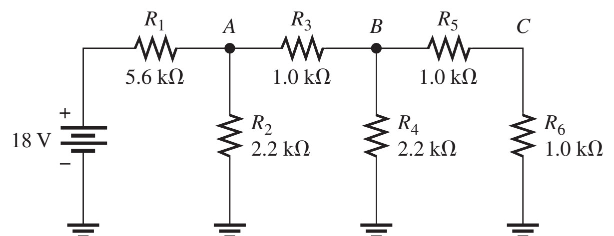
(a) La resistencia total entre las terminales de la fuente **(b)** La corriente total suministrada por la fuente

(c) La corriente a través del resistor de 910 Ω **(d)** El voltaje desde el punto *A* hasta el punto *B*

40. Determine la resistencia total y el voltaje en los nodos *A*, *B* y *C* de la red en escalera mostrada en la figura 7-78.



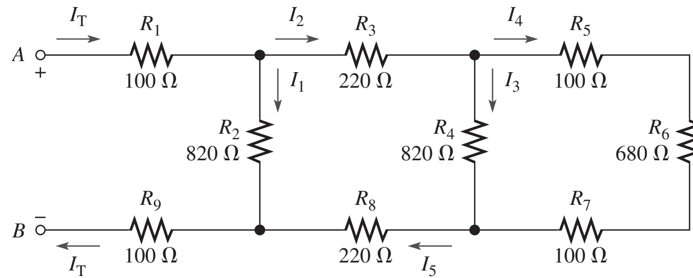
▲ FIGURA 7–77



▲ FIGURA 7–78

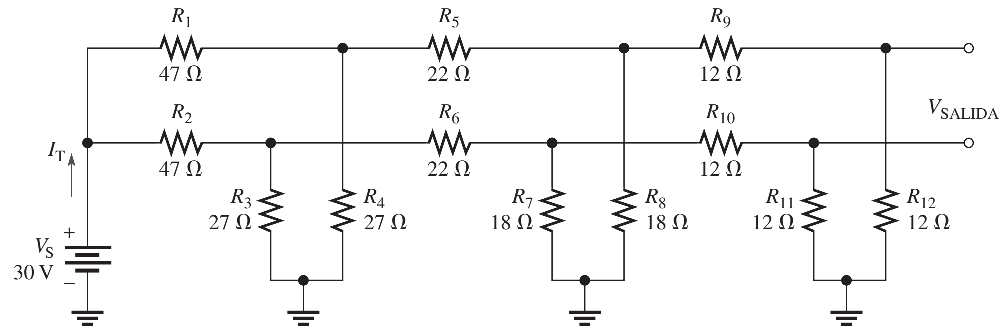
*41. Determine la resistencia total entre las terminales *A* y *B* de la red en escalera de la figura 7-79. Asimismo, calcule la corriente en cada rama con 10 V entre *A* y *B*.

42. En la figura 7-79, ¿cuál es el voltaje entre los extremos de cada resistor con 10 V entre *A* y *B*?



▲ **FIGURA 7–79**

*43. Determine I_T y V_{SALIDA} en la figura 7-80.

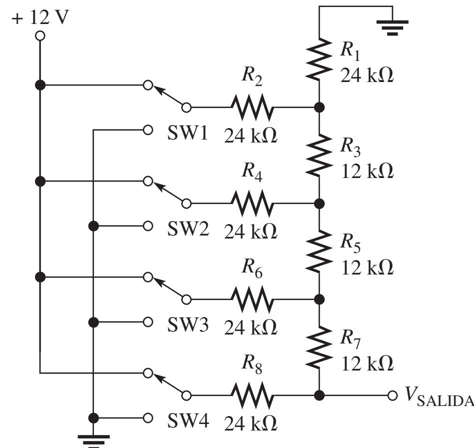


▲ **FIGURA 7–80**

44. Determine V_{SALIDA} para la red *R*/2*R* en escalera mostrada en la figura 7-81 para las siguientes condiciones:

(a) Interruptor SW2 conectado a +12 V y los demás conectados a tierra

(b) Interruptor SW1 conectado a +12 V y los demás conectados a tierra



▲ **FIGURA 7–81**

45. Repita el problema 44 para las siguientes condiciones

(a) SW3 y SW4 conectados a +12 V, SW1 y SW2 a tierra

(b) SW3 y SW1 conectados a +12 V, SW2 y SW4 a tierra

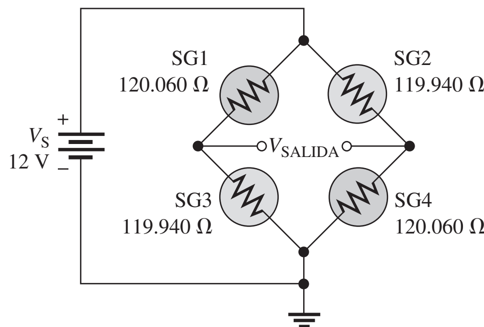
(c) Todos los interruptores conectados a +12 V

SECCIÓN 7–6 El puente Wheatstone

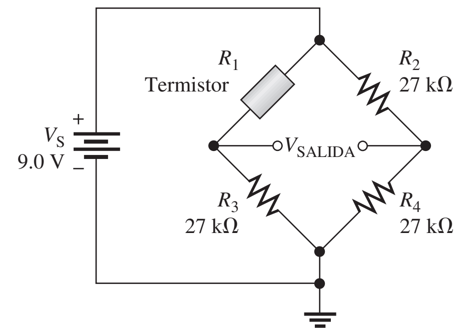
46. Se conecta un resistor de valor desconocido a un circuito puente Wheatstone. Los parámetros del puente en equilibrio se establecen como sigue: $R_V = 18\ \text{k}\Omega$ y $R_2/R_4 = 0.02$. ¿Cuál es R_X?

47. Una celda de carga tiene cuatro medidores de deformación idénticos con una resistencia ilimitada de 120,000 Ω para cada medidor (un valor estándar). Cuando se agrega una carga, los medidores a tensión incrementan su resistencia en 60 mΩ, a 120,060 Ω, y los medidores a compresión disminuyen su resistencia en 60 mΩ, a 119.940 Ω, como se muestra en la figura 7-82. ¿Cuál es el voltaje de salida con carga?

48. Determine el voltaje de salida para el puente desequilibrado mostrado en la figura 7-83 a una temperatura de 60°C. La característica de resistencia según la temperatura del termistor se muestra en la figura 7-60.



▲ FIGURA 7–82

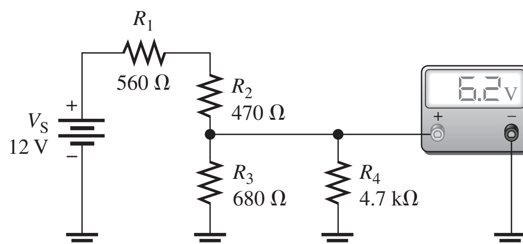


▲ FIGURA 7–83

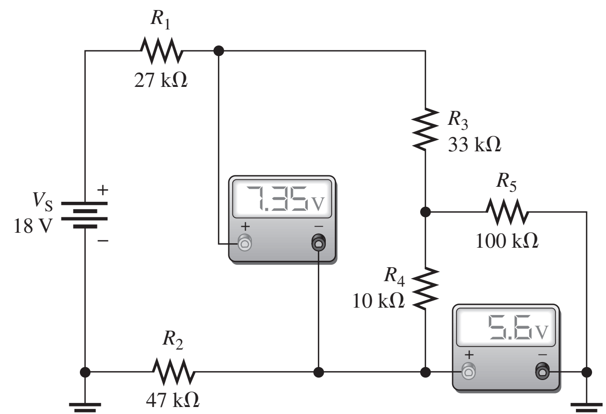
SECCIÓN 7–7 Localización de fallas

49. ¿Es correcta la lectura del voltímetro de la figura 7-84?

50. ¿Son correctas las lecturas del medidor mostrado en la figura 7-85?

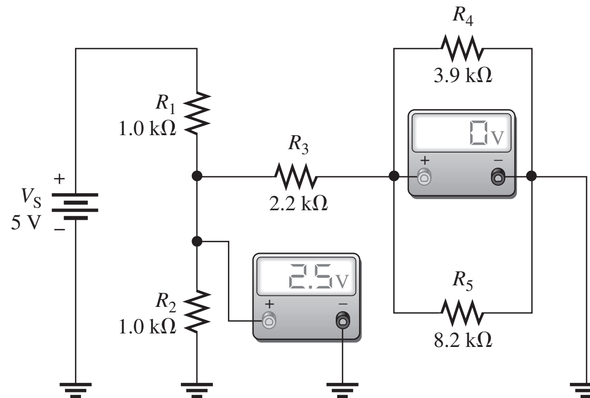


▲ FIGURA 7–84



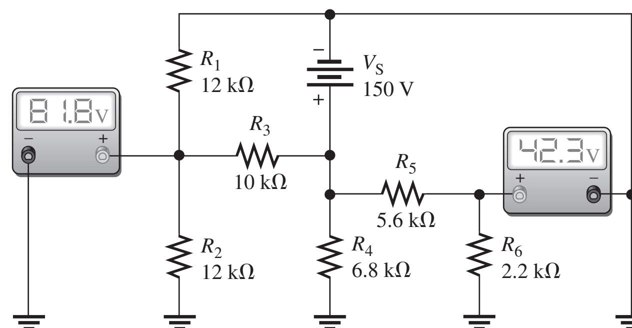
▲ FIGURA 7–85

51. En la figura 7-86 hay una falla. Con base en las indicaciones del medidor, determine cuál es la falla.



▲ **FIGURA 7–86**

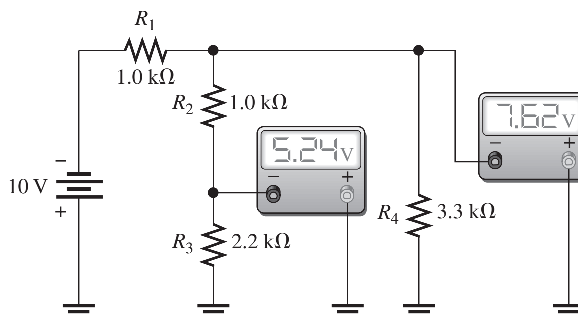
52. Vea los medidores ilustrados en la figura 7-87 y determine si hay una falla en el circuito. Si la hay, identifíquela.



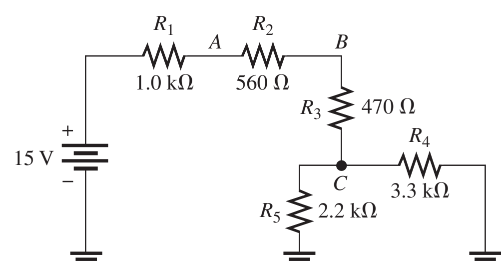
▲ **FIGURA 7–87**

53. Revise las lecturas de los medidores de la figura 7-88 y localice cualquier falla que pudiera existir.

54. Si en la figura 7-89 R_2 se abre, ¿qué voltajes se leerán en los puntos A, B y C?



▲ **FIGURA 7–88**



▲ **FIGURA 7–89**



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim

55. Abra el archivo P07-55 y mida la resistencia total.

56. Abra el archivo P07-56. Determine por medición si hay un resistor abierto y, si lo hay, ¿cuál es?

57. Abra el archivo P07-57 y mida la resistencia no especificada.

58. Abra el archivo P07-58 y determine qué tanto afecta la resistencia de carga a cada uno de los voltajes en los resistores.

59. Abra el archivo P07-59 y localice el resistor en cortocircuito, si hay uno.

60. Abra el archivo P07-60 y ajuste el valor de R_X hasta que el puente esté aproximadamente equilibrado.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 7–1 Identificación de relaciones en serie-paralelo

1. Un circuito resistivo en serie-paralelo es un circuito compuesto de conexiones dispuestas tanto en serie como en paralelo.

2. Vea la figura 7-90.

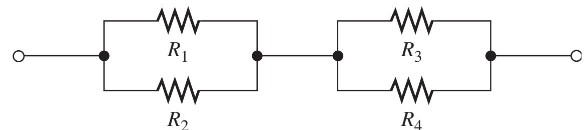
3. Los resistores R_1 y R_2 están en serie con la combinación en paralelo de R_3 y R_4.

4. R_3, R_4 y R_5 están en paralelo. Asimismo, la combinación en serie-paralelo $R_2 + (R_3 \| R_4 \| R_5$ está en paralelo con R_1.

5. Los resistores R_1 y R_2 están en paralelo; R_3 y R_4 están en paralelo.

6. Sí, las combinaciones en paralelo están en serie.

▶ FIGURA 7–90



SECCIÓN 7–2 Análisis de circuitos resistivos en serie-paralelo

1. En el análisis de combinaciones en serie-paralelo se pueden utilizar las fórmulas del divisor de voltaje y del divisor de corriente, las leyes de Kirchhoff, y la ley de Ohm.

2. $R_T = R_1 + R_2 \| R_3 + R_4 = 608\ \Omega$

3. $I_3 = [R_2/(R_2 + R_3)]I_T = 11.1$ mA

4. $V_2 = I_2R_2 = 3.65$ V

5. $R_T = 47\ \Omega + 27\ \Omega + (27\ \Omega + 27\ \Omega) \| 47\ \Omega = 99.1\ \Omega$; $I_T = 1\text{ V}/99.1\ \Omega = 10.1$ mA

SECCIÓN 7–3 Divisores de voltaje con cargas resistivas

1. El resistor de carga disminuye el voltaje de salida.

2. Verdadero.

3. $V_{\text{SALIDA(sin carga)}} = (100\text{ k}\Omega/147\text{ k}\Omega)30\text{ V} = 20.4$ V; $V_{\text{SALIDA(con carga)}} = (9.1\text{ k}\Omega/56.1\text{ k}\Omega)30\text{ V} = 4.87$ V

SECCIÓN 7–4 Efecto de carga de un voltímetro

1. Un voltímetro aplica carga a un circuito porque la resistencia interna del medidor aparece en paralelo con la resistencia del circuito entre el cual está conectado, por lo que la resistencia entre esos dos puntos del circuito disminuye y se extrae corriente del circuito.

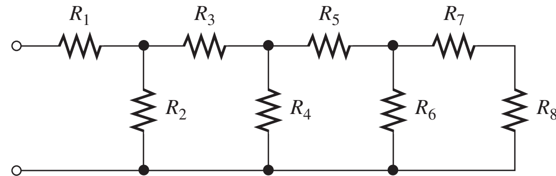
2. No, porque la resistencia del medidor es mucho más grande que 1.0 kΩ.

3. Sí.

SECCIÓN 7–5 Redes en escalera

1. Vea la figura 7-91.
2. $R_T = 11.6\ k\Omega$
3. $I_T = 10\ V/11.6\ k\Omega = 859\ \mu A$
4. $I_2 = 640\ \mu A$
5. $V_A = 1.41\ V$

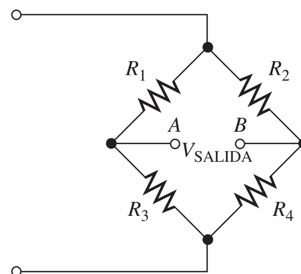
▶ FIGURA 7–91



SECCIÓN 7–6 El puente Wheatstone

1. Vea la figura 7-92.
2. El puente alcanza el estado de equilibrio cuando $V_A = V_B$; es decir, cuando $V_{SALIDA} = 0$.
3. $R_X = 15\ k\Omega$
4. Se utiliza un puente desequilibrado para medir cantidades detectadas por un transductor.

▶ FIGURA 7–92



SECCIÓN 7–7 Localización de fallas

1. Las aberturas y los cortos son fallas comunes en los circuitos.
2. El resistor de 10 kΩ (R_3) está abierto.
3. **(a)** $V_A = 55\ V$ **(b)** $V_A = 55\ V$ **(c)** $V_A = 54.2\ V$ **(d)** $V_A = 100\ V$ **(e)** $V_A = 0\ V$

Una aplicación de circuito

1. $P = 2.25$ W; sí, un efecto minúsculo.
2. La carga disminuye.
3. Sí, el peor caso es $R_{termistor} = 0$, por tanto hay 15 V entre los extremos de $R_3 + R_4$, y la potencia se reduce a menos de ⅛ W.
4. El voltaje de salida del amplificador operacional sólo puede estar a un nivel máximo o mínimo, causando que un LED o el otro estén encendidos uno a la vez, pero no ambos.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

7–1 El nuevo resistor está en paralelo con $R_4 + R_2 \| R_3$.

7–2 El resistor no tiene efecto porque está en cortocircuito.

7–3 El nuevo resistor está en paralelo con R_5.

7–4 *A* a tierra: $R_T = R_4 + R_3 \| (R_1 + R_2)$
B a tierra: $R_T = R_4 + R_2 \| (R_1 + R_3)$
C a tierra: $R_T = R_4$

7–5 R_3 y R_6 están en serie.
7–6 55.1 Ω
7–7 128.3 Ω
7–8 2.38 mA
7–9 $I_1 = 35.7$ mA; $I_3 = 23.4$ mA
7–10 $V_A = 44.8$ V; $V_1 = 35.2$ V
7–11 2.04 V
7–12 $V_{AB} = 5.48$ V; $V_{BC} = 1.66$ V; $V_{CD} = 0.86$ V
7–13 3.39 V
7–14 R_1, R_2 y R_3 se incrementan proporcionalmente.
7–15 5.19 V
7–16 $I_1 = 7.16$ mA; $I_2 = 3.57$ mA; $I_3 = 3.57$ mA; $I_4 = 1.74$ mA; $I_5 = 1.85$ mA; $I_6 = 1.85$ mA; $V_A = 29.3$ V; $V_B = 17.4$ V; $V_C = 8.70$ V
7–17 3.3 kΩ
7–18 0.45 V
7–19 5.73 V; 0 V
7–20 9.46 V
7–21 $V_A = 12$ V; $V_B = 13.8$ V

AUTOEVALUACIÓN

1. (e) **2.** (c) **3.** (c) **4.** (c) **5.** (b) **6.** (a) **7.** (b) **8.** (b)
9. (d) **10.** (b) **11.** (b) **12.** (b) **13.** (b) **14.** (a) **15.** (d)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (b) **2.** (a) **3.** (a) **4.** (a) **5.** (b) **6.** (a)
7. (b) **8.** (c) **9.** (c) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (a)
13. (b) **14.** (b) **15.** (a) **16.** (a) **17.** (a)

8 TEOREMAS DE CIRCUITOS Y CONVERSIONES

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Describir las características de una fuente de voltaje de cd
- Describir las características de una fuente de corriente
- Realizar conversiones de fuente
- Aplicar el teorema de superposición al análisis de circuitos
- Aplicar el teorema de Thevenin para simplificar un circuito para su análisis
- Aplicar el teorema de Norton para simplificar un circuito
- Aplicar el teorema de transferencia de potencia máxima
- Realizar conversiones Δ a Y y Y a Δ

TÉRMINOS CLAVE

- Equivalencia terminal
- Teorema de Norton
- Teorema de superposición
- Teorema de Thevenin
- Transferencia de potencia máxima

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, un circuito de control y medición de temperatura utiliza un puente de Wheatstone como el que se estudió en el capítulo 7. En la evaluación de este circuito, se aplicará el teorema de Thevenin así como otras técnicas.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En capítulos previos fueron analizados diversos tipos de circuitos mediante la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff. Algunas variedades de circuitos son difíciles de analizar con sólo estas leyes básicas y requieren de métodos adicionales para simplificar su estudio.

Los teoremas y las conversiones presentados en este capítulo facilitan el análisis de ciertos tipos de circuitos. Estos métodos no reemplazan a la ley de Ohm ni a las leyes de Kirchhoff, sino que normalmente se utilizan junto con ellas en ciertas situaciones.

Debido a que todos los circuitos eléctricos son controlados por fuentes de voltaje o de corriente, es importante entender cómo funcionan estos elementos. El teorema de superposición nos ayudará a abordar circuitos que tienen múltiples fuentes. Los teoremas de Thevenin y de Norton ponen a nuestro alcance métodos apropiados para reducir un circuito a una forma equivalente simple con el propósito de facilitar su análisis. El teorema de transferencia de potencia máxima se utiliza en aplicaciones donde es importante que un circuito dado proporcione potencia máxima a una carga. Un ejemplo de esto es un amplificador de audio que suministra potencia máxima a un altavoz. Las conversiones delta a Y y Y a delta resultan muy útiles cuando se analizan circuitos puente encontrados generalmente en sistemas que miden parámetros físicos tales como temperatura, presión, y deformación.

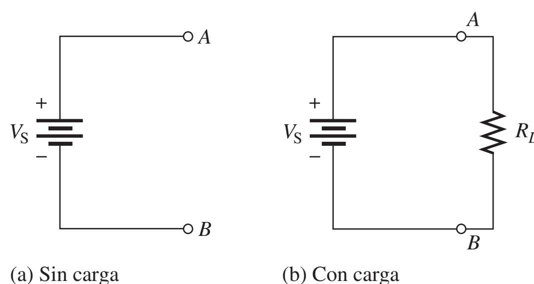
8–1 LA FUENTE DE VOLTAJE DE CD

Como se aprendió en el capítulo 2, en aplicaciones electrónicas, la fuente de voltaje de cd es uno de los principales tipos de fuente de energía, así que resulta importante entender sus características. La fuente de voltaje de cd idealmente proporciona un voltaje constante a una carga, incluso cuando la resistencia de ésta varía.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir las características de una fuente de voltaje de cd**
  - Comparar una fuente de voltaje práctica con una fuente ideal
  - Analizar el efecto de carga en una fuente de voltaje práctica

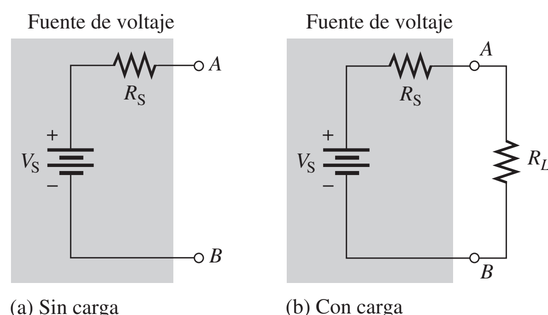
La figura 8-1(a) es el muy conocido símbolo empleado para identificar una fuente de voltaje de cd ideal. El voltaje presente entre sus terminales, *A* y *B*, permanece fijo sin importar el valor de la resistencia de la carga que pudiera estar conectada entre sus terminales de salida. La figura 8-1(b) muestra una resistor de carga, R_L, conectado. Todo el voltaje de fuente, V_S, actúa entre los extremos de R_L. Idealmente, R_L puede ser cambiado a cualquier valor excepto a cero, y el voltaje permanecerá fijo. La resistencia interna de la fuente de voltaje ideal es de cero.



◀ **FIGURA 8–1**

Fuente de voltaje ideal de cd.

En realidad, ninguna fuente de voltaje es ideal; sin embargo, las fuentes de potencia regulada se aproximan a la situación ideal cuando funcionan dentro de la corriente de salida especificada. Todas las fuentes de voltaje tienen algo de resistencia interna inherente a consecuencia de su composición física o química, la cual puede ser representada mediante un resistor dispuesto en serie con una fuente ideal, como indica la figura 8-2(a). R_S es la resistencia interna de la fuente y V_S es su voltaje. Sin carga, el voltaje de salida (voltaje de *A* a *B*) es V_S. Este voltaje en ocasiones se denomina *voltaje de circuito abierto*.



◀ **FIGURA 8–2**

Fuente de voltaje práctica.

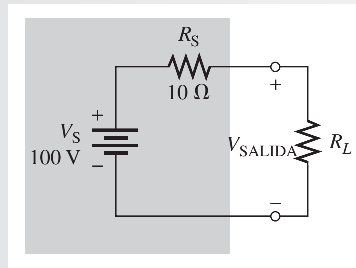
Carga de la fuente de voltaje

Cuando se conecta un resistor de carga entre las terminales de salida, como indica la figura 8-2(b), no aparece todo el voltaje de la fuente entre los extremos de R_L. Una parte del voltaje actúa entre los extremos de R_S porque R_S y R_L están en serie.

Si R_S es muy pequeño comparado con R_L, la fuente se aproxima a la situación ideal porque casi todo el voltaje de fuente, V_S, aparece entre los extremos de la resistencia más grande, R_L. Muy poco voltaje actúa entre los extremos de la resistencia interna, R_S. Si R_L cambia, la mayor parte del voltaje de fuente permanece entre las terminales de salida en tanto R_L sea mucho más grande que R_S. Por consiguiente, ocurre un cambio muy pequeño en el voltaje de salida. Mientras más grande es R_L, en comparación con R_S, menos cambio ocurre en el voltaje de salida. El ejemplo 8-1 ilustra el efecto que los cambios en R_L imprimen en el voltaje de salida cuando R_L es mucho más grande que R_S.

EJEMPLO 8–1 Calcule el voltaje de salida de la fuente mostrada en la figura 8-3 para los siguientes valores de R_L: 100 Ω, 560 Ω, 1.0 kΩ.

▶ **FIGURA 8–3**



Solución Para $R_L = 100\ \Omega$, el voltaje de salida es

$$V_{SALIDA} = \left(\frac{R_L}{R_S + R_L}\right)V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{110\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{90.9\ V}$$

Para $R_L = 560\ \Omega$,

$$V_{SALIDA} = \left(\frac{560\ \Omega}{570\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{98.2\ V}$$

Para $R_L = 1.0\ \text{k}\Omega$,

$$V_{SALIDA} = \left(\frac{1000\ \Omega}{1010\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{99.0\ V}$$

Observe que el voltaje de salida se encuentra dentro del 10% del voltaje de fuente, V_S, para los tres valores de R_L porque R_L es por lo menos diez veces R_S.

Problema relacionado* En la figura 8-3, determine V_{SALIDA} si $R_S = 50\ \Omega$ y $R_L = 10\ \text{k}\Omega$.



Use el archivo Multisim E08-01 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

El voltaje de salida disminuye significativamente conforme la resistencia de la carga se reduce en comparación con la resistencia interna de la fuente. El ejemplo 8-2 ilustra el efecto de un R_L más pequeño y confirma el requerimiento de que R_L tiene que ser mucho más grande que R_S (por lo menos diez veces) para mantener el voltaje de salida cerca de su valor de circuito abierto.

EJEMPLO 8–2 En la figura 8-3, determine V_{SALIDA} para $R_L = 10\ \Omega$ y $R_L = 1.0\ \Omega$.

Solución Para $R_L = 10\ \Omega$, el voltaje de salida es

$$V_{SALIDA} = \left(\frac{R_L}{R_S + R_L}\right)V_S = \left(\frac{10\ \Omega}{20\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{50\ V}$$

Para $R_L = 1.0\ \Omega$,

$$V_{SALIDA} = \left(\frac{1.0\ \Omega}{11\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{9.09\ V}$$

Problema relacionado ¿Cuál es V_{SALIDA} sin resistor de carga en la figura 8-3?

REPASO DE LA SECCIÓN 8-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. **¿Cuál es el símbolo empleado para identificar la fuente de voltaje ideal?**
2. **Dibuje una fuente de voltaje práctica.**
3. **¿Cuál es la resistencia interna de la fuente de voltaje ideal?**
4. **¿Qué efectos tiene la carga en el voltaje de salida de la fuente de voltaje práctica?**

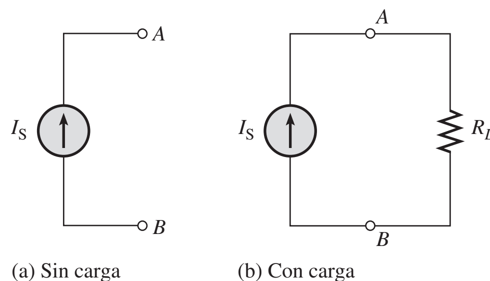
8–2 LA FUENTE DE CORRIENTE

Como se aprendió en el capítulo 2, la fuente de corriente es otro tipo de fuente de energía que idealmente suministra una corriente constante a una carga, incluso cuando la resistencia de ésta varía. El concepto de fuente de corriente es importante en ciertos tipos de circuitos transistorizados.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir las características de una fuente de corriente**
  - Comparar una fuente de corriente práctica con una fuente ideal
  - Analizar el efecto de carga en una fuente de corriente práctica

La figura 8-4(a) muestra un símbolo empleado para identificar la fuente de corriente ideal. La flecha indica la dirección que lleva la corriente en la fuente, I_S. Una fuente de corriente ideal produce un valor constante de corriente a través de una carga, sin importar el valor de la carga. Este concepto se ilustra en la figura 8-4(b), donde el resistor de carga está conectado a la fuente de corriente entre las terminales A y B. La fuente de corriente ideal tiene una resistencia interna en paralelo que es infinitamente grande.



◀ **FIGURA 8–4**

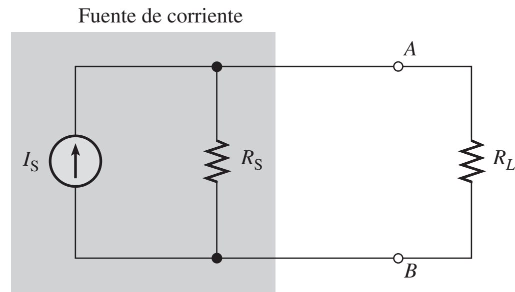
Fuente de corriente ideal.

Los transistores actúan básicamente como fuentes de corriente, y por esta razón, resulta fundamental conocer el concepto de fuente de corriente. Se verá que el modelo equivalente de un transistor contiene una fuente de corriente.

Aunque en la mayor parte del trabajo de análisis se puede utilizar la fuente de corriente ideal, ningún dispositivo real es ideal. En la figura 8-5 se muestra una representación de fuente de corriente práctica. En ésta, la resistencia interna aparece en paralelo con la fuente de corriente ideal.

▶ **FIGURA 8–5**

Fuente de corriente práctica con carga.



Si la resistencia interna de la fuente, R_S, es mucho más grande que un resistor de carga, la fuente práctica se aproxima a la fuente ideal. La razón se ilustra en la fuente de corriente práctica mostrada en la figura 8-5. Una parte de la corriente, I_S, pasa por R_S y otra por R_L. La resistencia interna de la fuente R_S y el resistor de carga, R_L, actúan como un divisor de corriente. Si R_S es mucho más grande que R_L, la mayor parte de la corriente pasa por R_L y muy poca por R_S. En tanto R_L continúe siendo mucho más pequeño que R_S, la corriente a través de R_L permanecerá casi constante, no importa cuánto cambie R_L.

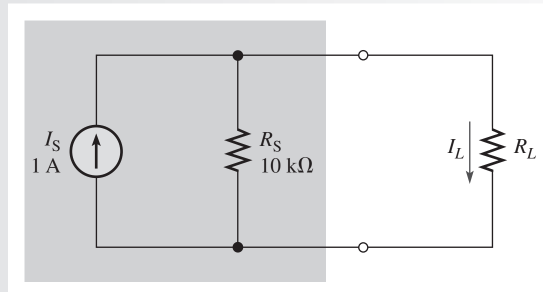
Si existe una fuente de corriente constante, normalmente se puede suponer que R_S es tanto más grande que la resistencia de la carga que R_S puede ser omitida. Esto simplifica la fuente a ideal, lo cual facilita el análisis.

El ejemplo 8-3 ilustra el efecto de los cambios de R_L en la corriente a través de la carga cuando R_L es mucho más pequeño que R_S. En general, R_L deberá ser por lo menos diez veces más pequeña que R_S ($10R_L \leq R_S$) para una fuente que actúe como fuente de corriente razonable.

EJEMPLO 8–3

Calcule la corriente a través de la carga (I_L) en la figura 8-6 para los siguientes valores de R_L: 100 Ω, 560 Ω, y 1.0 kΩ.

▶ **FIGURA 8–6**



Solución Para $R_L = 100\ \Omega$, la corriente a través de la carga es

$$I_L = \left(\frac{R_S}{R_S + R_L}\right)I_S = \left(\frac{10\text{ k}\Omega}{10.1\text{ k}\Omega}\right)1\text{ A} = \mathbf{990\ mA}$$

Para $R_L = 560\ \Omega$,

$$I_L = \left(\frac{10\text{ k}\Omega}{10.56\text{ k}\Omega}\right)1\text{ A} = \mathbf{947\ mA}$$

Para $R_L = 1.0\,\text{k}\Omega$,

$$I_L = \left(\frac{10\,\text{k}\Omega}{11\,\text{k}\Omega}\right)1\text{ A} = \mathbf{909\,mA}$$

Observe que la corriente a través de la carga, I_L, se encuentra dentro del 10% de la corriente en la fuente para cada valor de R_L porque R_L es por lo menos diez veces más pequeño que R_S en cada caso.

Problema relacionado En la figura 8-6, ¿con qué valor de R_L la corriente a través de la carga será igual a 750 mA?

REPASO DE LA SECCIÓN 8-2

1. **¿Cuál es el símbolo empleado para identificar una fuente de corriente ideal?**
2. **Dibuje la fuente de corriente práctica.**
3. **¿Cuál es la resistencia interna de la fuente de corriente ideal?**
4. **¿Qué efecto tiene la carga en la corriente de carga de la fuente de corriente práctica?**

8–3 CONVERSIONES DE FUENTE

En el análisis de circuitos, en ocasiones es útil convertir una fuente de voltaje en una fuente de corriente equivalente, o viceversa.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

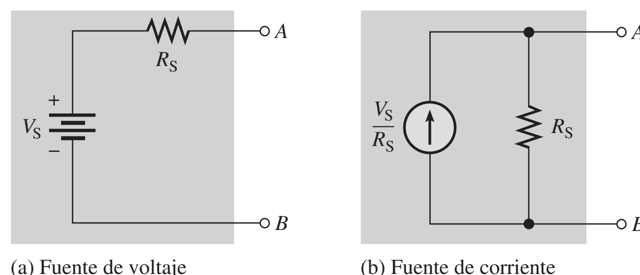
- **Realizar conversiones de fuente**
  - Convertir una fuente de voltaje en una fuente de corriente
  - Convertir una fuente de corriente en una fuente de voltaje
  - Definir el término *equivalencia terminal*

Conversión de una fuente de voltaje en una fuente de corriente

El voltaje de fuente, V_S, dividido entre la resistencia interna de la fuente, R_S, da el valor de la corriente de la fuente equivalente.

$$I_S = \frac{V_S}{R_S}$$

El valor de R_S es el mismo tanto con la fuente de voltaje como con la fuente de corriente. Como se ilustra en la figura 8-7, la flecha direccional para la corriente apunta de menos a más. La fuente de corriente equivalente está en paralelo con R_S.



(a) Fuente de voltaje (b) Fuente de corriente

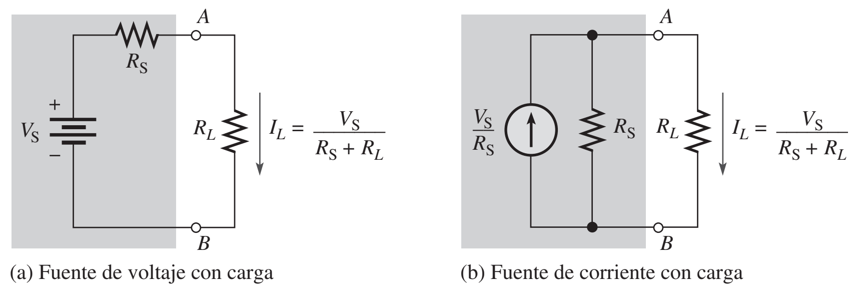
◄ **FIGURA 8–7**

Conversión de una fuente de voltaje en una fuente de corriente equivalente.

Equivalencia de dos fuentes significa que con cualquier resistencia de carga dada que se conecte a las dos fuentes, ambas fuentes producen el mismo voltaje de carga y la misma corriente de carga. Este concepto de llama **equivalencia terminal**.

Se puede demostrar que la fuente de voltaje y la fuente de corriente ilustradas en la figura 8-7 son equivalentes conectando un resistor de carga a cada una, como indica la figura 8-8, y calculando luego la corriente de carga. Para la fuente de voltaje, la corriente de carga es

$$I_L = \frac{V_S}{R_S + R_L}$$



▲ **FIGURA 8–8**

Fuentes equivalentes con carga.

Para la fuente de corriente,

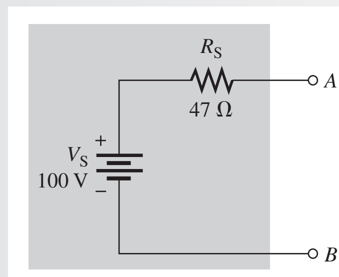
$$I_L = \left(\frac{R_S}{R_S + R_L}\right)\frac{V_S}{R_S} = \frac{V_S}{R_S + R_L}$$

Como puede observar, para I_L ambas expresiones son las mismas. Estas ecuaciones demuestran que las fuentes son equivalentes por lo que se refiere a la carga y a las terminales *A* y *B*.

EJEMPLO 8–4

Convierta la fuente de voltaje que aparece en la figura 8-9 en una fuente de corriente equivalente, y muestre el circuito equivalente.

▶ **FIGURA 8–9**

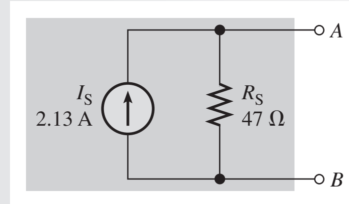


Solución El valor de la resistencia interna, R_S, de la fuente equivalente es el mismo que la resistencia interna de la fuente de voltaje. Por consiguiente, la fuente de corriente equivalente es

$$I_S = \frac{V_S}{R_S} = \frac{100\text{ V}}{47\ \Omega} = 2.13\text{ A}$$

La figura 8-10 muestra el circuito equivalente.

▶ FIGURA 8–10



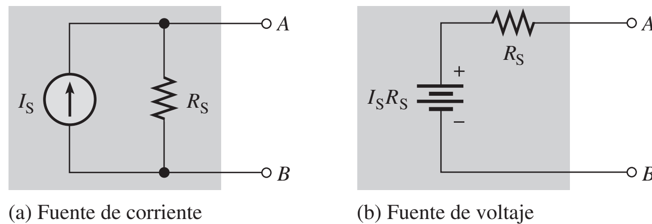
Problema relacionado Determine I_S y R_S de una fuente de corriente equivalente a una fuente de voltaje con $V_S = 12$ V y $R_S = 10\ \Omega$.

Conversión de una fuente de corriente en una fuente de voltaje

La corriente de la fuente, I_S, multiplicada por la resistencia interna de la fuente, R_S, da el valor del voltaje de la fuente equivalente.

$$V_S = I_S R_S$$

De nuevo, R_S no cambia. La polaridad de la fuente de voltaje es de menos a más en la dirección de la corriente. La fuente de voltaje equivalente es el voltaje en serie con R_S, como ilustra la figura 8-11.



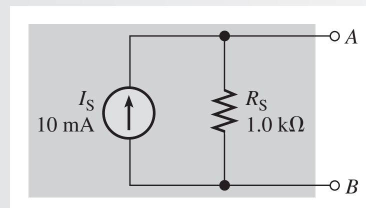
(a) Fuente de corriente (b) Fuente de voltaje

▲ FIGURA 8–11

Conversión de una fuente de corriente en una fuente de voltaje equivalente.

EJEMPLO 8–5 Convierta la fuente de corriente que aparece en la figura 8-12 en una fuente de voltaje equivalente, y muestre el circuito equivalente.

▶ FIGURA 8–12

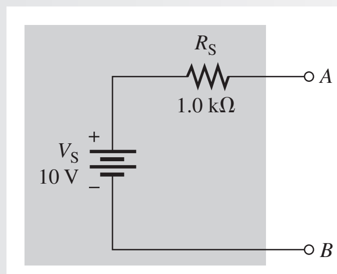


Solución El valor de R_S es el mismo que con la fuente de corriente. Por tanto, la fuente de voltaje equivalente es

$$V_S = I_S R_S = (10\text{ mA})(1.0\text{ k}\Omega) = 10\text{ V}$$

La figura 8-13 muestra el circuito equivalente.

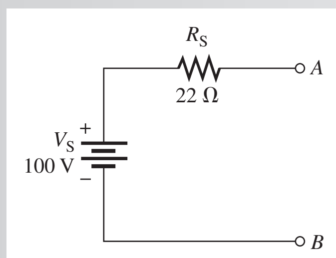
▶ FIGURA 8–13



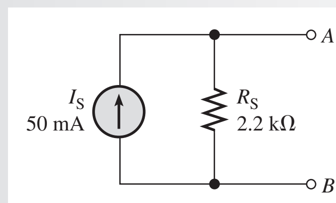
Problema relacionado Determine V_S y R_S de una fuente de voltaje equivalente a una fuente de corriente con I_S = 500 mA y R_S = 600 Ω.

REPASO DE LA SECCIÓN 8-3

1. **Escriba la fórmula necesaria para convertir una fuente de voltaje en una fuente de corriente.**
2. **Escriba la fórmula necesaria para convertir una fuente de corriente en una fuente de voltaje.**
3. **Convierta la fuente de voltaje mostrada en la figura 8-14 en una fuente de corriente equivalente.**
4. **Convierta la fuente de corriente mostrada en la figura 8-15 en una fuente de voltaje equivalente.**



▲ FIGURA 8–14



▲ FIGURA 8–15

8–4 EL TEOREMA DE SUPERPOSICIÓN

Algunos circuitos requieren la instalación de más de una fuente de voltaje o de corriente. Por ejemplo, la mayoría de los amplificadores operan con dos fuentes de voltaje: una fuente de cd y una de ca. Adicionalmente, algunos amplificadores requieren tanto una fuente de voltaje de cd positiva como una negativa para operar apropiadamente. Cuando en un circuito se utilizan múltiples fuentes, el teorema de superposición proporciona un método de análisis.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema de superposición al análisis de circuitos**
  - Enunciar el teorema de superposición
  - Enumerar los pasos a seguir para aplicar el teorema de superposición

El método de superposición es una forma de determinar corrientes en un circuito con múltiples fuentes dejando una fuente a la vez y reemplazando las demás fuentes por sus resistencias

internas. Recuerde que una fuente de voltaje ideal tiene resistencia interna de cero y una fuente de corriente ideal tiene resistencia interna infinita. Todas las fuentes serán tratadas como ideales para simplificar su uso.

Un enunciado general del **teorema de superposición** es como sigue:

En cualquier rama dada de un circuito con múltiples fuentes, la corriente puede calcularse al determinar en esa rama particular las corrientes producidas por cada fuente que actúa sola, con todas las demás fuentes reemplazadas por sus resistencias internas. La corriente total en la rama es la suma algebraica de las corrientes individuales presentes en dicha rama.

Los pasos para aplicar el método de superposición son los siguientes:

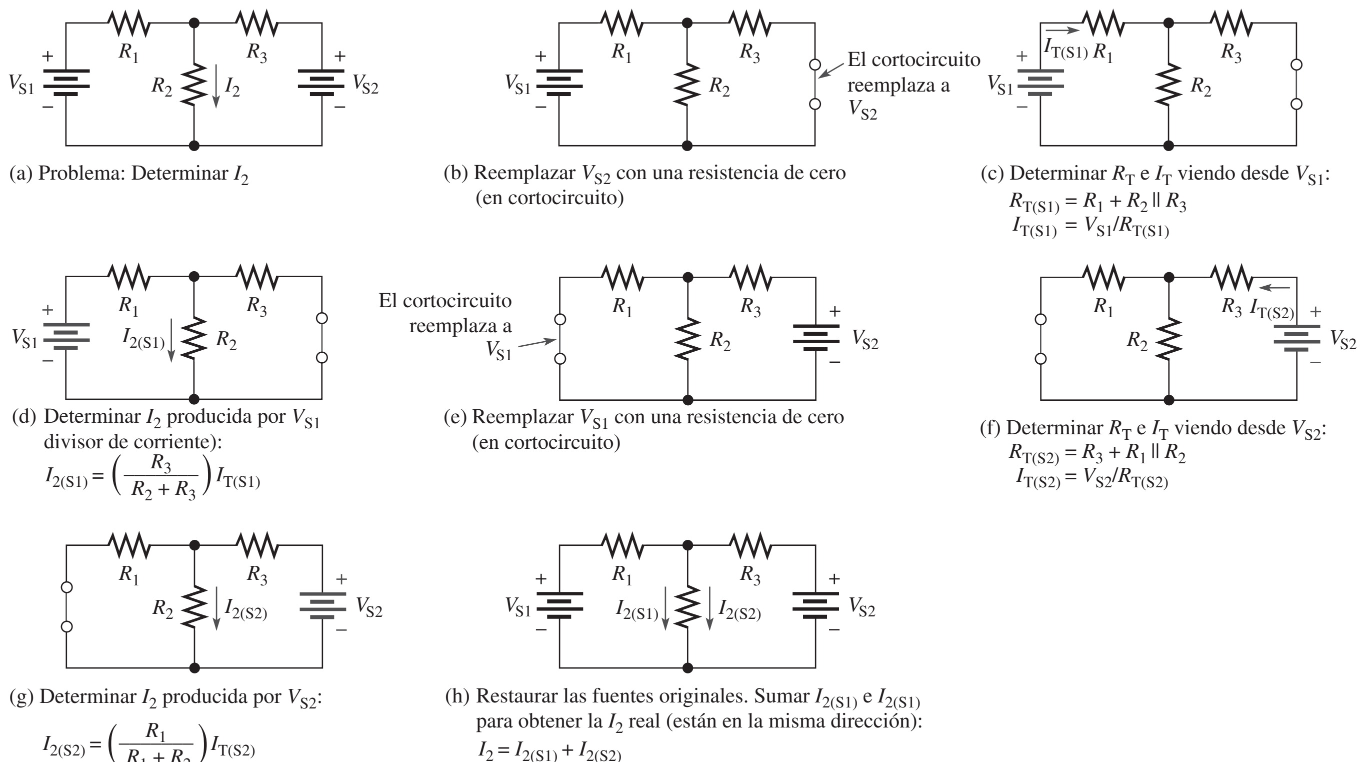
Paso 1. Dejar una fuente de voltaje (o de corriente) a la vez en el circuito y reemplazar cada una de las demás fuentes de voltaje (o de corriente) con su resistencia interna. Para fuentes ideales, un corto representa resistencia interna de cero y una abertura representa resistencia interna infinita.

Paso 2. Determinar la corriente (o el voltaje) particular que se desea justo como si hubiera sólo una fuente en el circuito.

Paso 3. Tomar la siguiente fuente que haya en el circuito y repetir los pasos 1 y 2. Hacer esto con cada una de las fuentes.

Paso 4. Sumar algebraicamente las corrientes producidas por cada fuente individual para encontrar la corriente real en una rama dada. (Si las corrientes están en la misma dirección, se suman. Si están en direcciones opuestas, se restan y la dirección de la corriente resultante será la misma que la presentada por la cantidad más grande de las cantidades originales.) Una vez determinada la corriente, ya se puede calcular el voltaje mediante la ley de Ohm.

El método para abordar la superposición se demuestra en la figura 8-16 para un circuito en serie-paralelo con dos fuentes de voltaje ideales. Estudie los pasos presentados en esta figura.

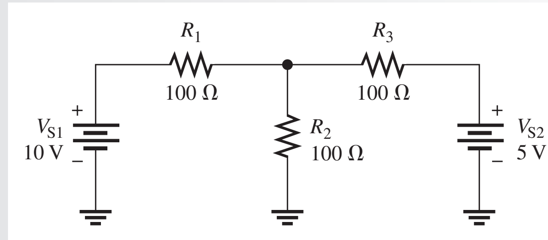


▲ **FIGURA 8–16**

Demostración del método de superposición.

EJEMPLO 8–6 Use el teorema de superposición para determinar la corriente a través de R_2 en la figura 8-17.

▶ FIGURA 8–17



Solución **Paso 1:** Reemplace V_{S2} con un corto y determine la corriente producida a través de R_2 por la fuente de voltaje V_{S1}, tal como indica la figura 8-18. Para determinar I_2, use la fórmula del divisor de corriente (Ecuación 6-6). Al ver desde V_{S1},

$$R_{T(S1)} = R_1 + \frac{R_3}{2} = 100\ \Omega + 50\ \Omega = 150\ \Omega$$

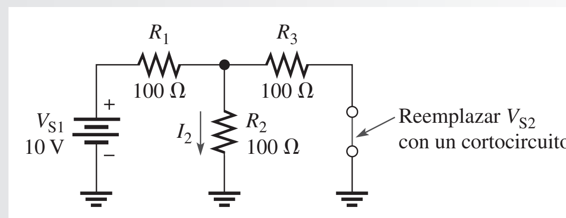
$$I_{T(S1)} = \frac{V_{S1}}{R_{T(S1)}} = \frac{10\ \text{V}}{150\ \Omega} = 66.7\ \text{mA}$$

La corriente producida a través de R_2 por V_{S1} es

$$I_{2(S1)} = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)I_{T(S1)} = \left(\frac{100\ \Omega}{200\ \Omega}\right)66.7\ \text{mA} = 33.3\ \text{mA}$$

Observe que esta corriente desciende por R_2.

▶ FIGURA 8–18



Paso 2: Encuentre la corriente a través de R_2 producida por la fuente de voltaje V_{S2} reemplazando V_{S1} con un corto, como indica la figura 8-19. Al ver desde V_{S2},

$$R_{T(S2)} = R_3 + \frac{R_1}{2} = 100\ \Omega + 50\ \Omega = 150\ \Omega$$

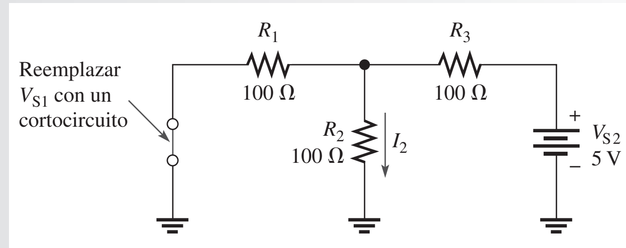
$$I_{T(S2)} = \frac{V_{S2}}{R_{T(S2)}} = \frac{5\ \text{V}}{150\ \Omega} = 33.3\ \text{mA}$$

La corriente producida a través de R_2 por V_{S2} es

$$I_{2(S2)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)I_{T(S2)} = \left(\frac{100\ \Omega}{200\ \Omega}\right)33.3\ \text{mA} = 16.7\ \text{mA}$$

Observe que esta corriente desciende por R_2.

▶ FIGURA 8–19



Paso 3: Ambos componentes de corrientes descienden por R_2, de modo que tienen el mismo signo algebraico. Por consiguiente, sume los valores para obtener la corriente total a través de R_2.

$$I_{2(\text{tot})} = I_{2(\text{S1})} + I_{2(\text{S2})} = 33.3 \text{ mA} + 16.7\text{mA} = \mathbf{50\ mA}$$

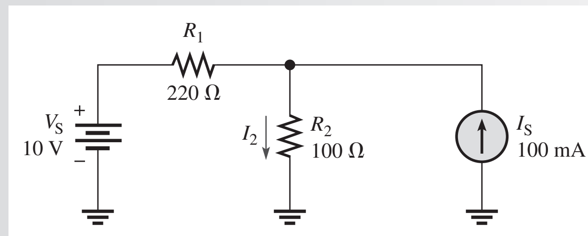
Problema relacionado Determine la corriente total a través de R_2 si, en la figura 8-17, se invierte la polaridad de V_{S2}.



Use el archivo Multisim E08-06 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

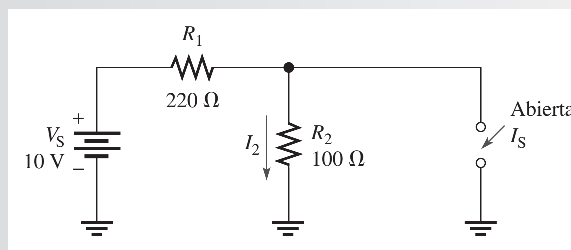
EJEMPLO 8–7 Encuentre la corriente a través de R_2 en el circuito de la figura 8-20.

▶ FIGURA 8–20



Solución **Paso 1:** Determine la corriente producida a través de R_2 por V_S reemplazando I_S con una abertura, según muestra la figura 8-21.

▶ FIGURA 8–21



Observe que toda la corriente producida por V_S circula a través de R_2. Al ver desde V_S,

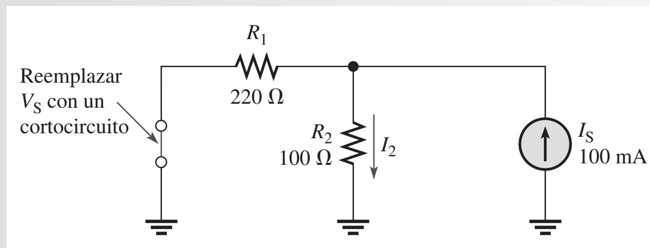
$$R_T = R_1 + R_2 = 320\ \Omega$$

La corriente producida a través de R_2 por V_S es

$$I_{2(V_S)} = \frac{V_S}{R_T} = \frac{10\text{ V}}{320\ \Omega} = 31.2\text{ mA}$$

Observe que esta corriente desciende por R_2.

Paso 2: Encuentre la corriente producida a través de R_2 por I_S reemplazando V_S con un corto, como indica la figura 8-22.



▲ **FIGURA 8–22**

Use la fórmula del divisor de corriente para determinar la corriente a través de R_2 producida por I_S.

$$I_{2(I_S)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)I_S = \left(\frac{220\ \Omega}{320\ \Omega}\right)100\ \text{mA} = 68.8\ \text{mA}$$

Observe que esta corriente desciende también por R_2.

Paso 3: Ambas corrientes circulan en la misma dirección a través de R_2, así que súmelas para obtener la corriente total.

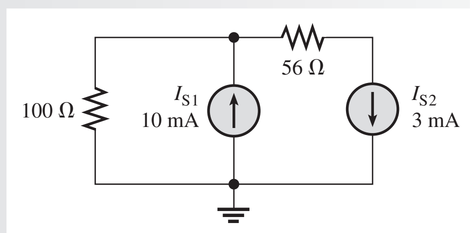
$$I_{2(\text{tot})} = I_{2(V_S)} + I_{2(I_S)} = 31.2\ \text{mA} + 68.8\ \text{mA} = \mathbf{100\ mA}$$

Problema relacionado Si se invierte la polaridad de V_S en la figura 8-20, ¿cómo se ve afectado el valor de I_S?

EJEMPLO 8–8

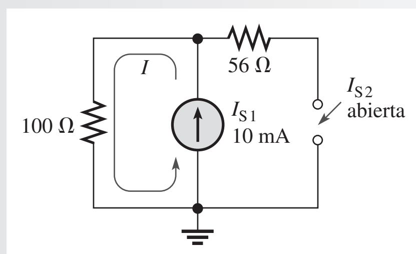
En la figura 8-23, encuentre la corriente a través del resistor de 100 Ω.

▶ **FIGURA 8–23**

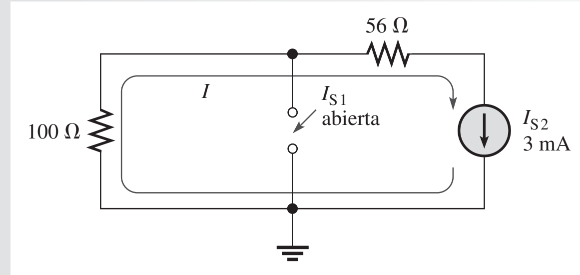


Solución **Paso 1:** A través del resistor de 100 Ω, encuentre la corriente producida por la fuente de corriente I_{S1} reemplazando la fuente I_{S2} con una abertura, según muestra la figura 8-24. Como puede verse, los 10 mA producidos por la fuente de corriente I_{S1} descienden a través del resistor de 100 Ω.

▶ **FIGURA 8–24**



Paso 2: A través del resistor de 100 Ω, encuentre la corriente producida por la fuente I_{S2} reemplazando la fuente I_{S1} con una abertura, como indica la figura 8-25. Observe que los 3 mA producidos por la fuente I_{S2} ascienden a través del resistor de 100 Ω.



▲ **FIGURA 8–25**

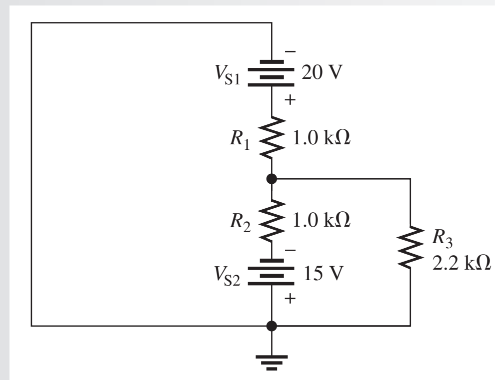
Paso 3: Para obtener la corriente que circula a través del resistor de 100 Ω, reste la corriente más pequeña de la más grande porque circulan en direcciones opuestas. La corriente total resultante circula en dirección de la corriente más grande desde la fuente I_{S1}.

$$I_{100\Omega(\text{tot})} = I_{100\Omega(I_{S1})} - I_{100\Omega(I_{S2})}$$
$$= 10\text{ mA} - 3\text{ mA} = \mathbf{7\text{ mA}}$$

La corriente resultante desciende por el resistor.

Problema relacionado Si el resistor de 100 Ω mostrado en la figura 8-23 cambia a 68 Ω, ¿cuál será la corriente a través de él?

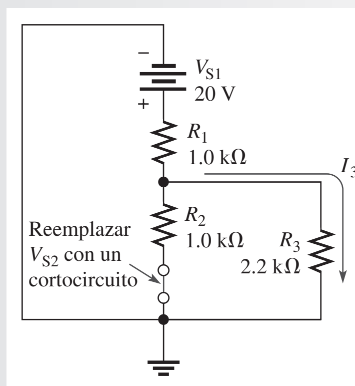
EJEMPLO 8–9 En la figura 8-26, determine la corriente que circula a través de R_3.



▲ **FIGURA 8–26**

Solución **Paso 1:** Encuentre la corriente producida a través de R_3 por la fuente V_{S1} reemplazando la fuente V_{S2} con un corto, como indica la figura 8-27.

▶ FIGURA 8–27



Al ver desde V_{S1},

$$R_{T(S1)} = R_1 + \frac{R_2R_3}{R_2 + R_3} = 1.0\,\text{k}\Omega + \frac{(1.0\,\text{k}\Omega)(2.2\,\text{k}\Omega)}{3.2\,\text{k}\Omega} = 1.69\,\text{k}\Omega$$

$$I_{T(S1)} = \frac{V_{S1}}{R_{T(S1)}} = \frac{20\text{ V}}{1.69\,\text{k}\Omega} = 11.8\text{ mA}$$

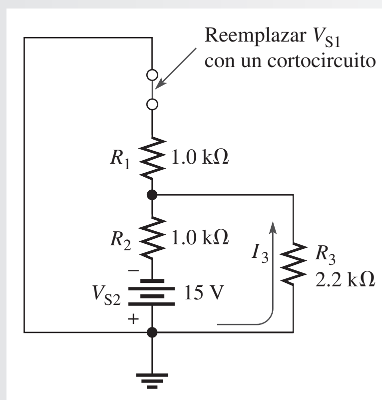
Ahora aplique la fórmula del divisor de corriente para obtener la corriente producida a través de R_3 por la fuente V_{S1}.

$$I_{3(S1)} = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right)I_{T(S1)} = \left(\frac{1.0\,\text{k}\Omega}{3.2\,\text{k}\Omega}\right)11.8\text{ mA} = 3.69\text{ mA}$$

Observe que esta corriente desciende por R_3.

Paso 2: Mediante el reemplazo de la fuente V_{S1} con un corto, determine la I_3 producida por la fuente V_{S2}, como indica la figura 8-28.

▶ FIGURA 8–28



Al ver desde V_{S2},

$$R_{T(S2)} = R_2 + \frac{R_1R_3}{R_1 + R_3} = 1.0\,\text{k}\Omega + \frac{(1.0\,\text{k}\Omega)(2.2\,\text{k}\Omega)}{3.2\,\text{k}\Omega} = 1.69\,\text{k}\Omega$$

$$I_{T(S2)} = \frac{V_{S2}}{R_{T(S2)}} = \frac{15\text{ V}}{1.69\,\text{k}\Omega} = 8.88\text{ mA}$$

Ahora aplique la fórmula del divisor de corriente para determinar la corriente producida a través de R_3 por la fuente V_{S2}.

$$I_{3(S2)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3}\right)I_{T(S2)} = \left(\frac{1.0\,\text{k}\Omega}{3.2\,\text{k}\Omega}\right)8.88\text{ mA} = 2.78\text{ mA}$$

Observe que esta corriente asciende por R_3.

Paso 3: Calcule la corriente total a través de R_3.

$$I_{3(\text{tot})} = I_{3(\text{S1})} - I_{3(\text{S2})} = 3.69\text{ mA} - 2.78\text{ mA} = 0.91\text{ mA} = \mathbf{910\ \mu A}$$

Esta corriente desciende por R_3.

Problema relacionado En la figura 8-26, determine $I_{3(\text{tot})}$ si V_{S1} cambia a 12 V y su polaridad se invierte.



Use el archivo Multisim E08-09 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

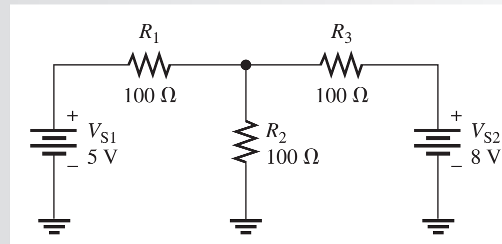
Aunque las fuentes de potencia de cd reguladas se aproximan a las fuentes de voltaje ideales, muchas fuentes de ca no lo hacen. Por ejemplo, es común que la resistencia interna de los generadores de función tenga 50 o 600 Ω, lo cual aparece como una resistencia en serie con una fuente ideal. Asimismo, las baterías pueden parecer ideales cuando están nuevas; pero a medida que envejecen, la resistencia interna se incrementa. Cuando se aplica el teorema de superposición, es importante reconocer cuando una fuente no es ideal y reemplazarla con su resistencia interna equivalente.

Las fuentes de corriente no son tan comunes como las de voltaje y tampoco son siempre ideales. Si una fuente de corriente no es ideal, como en el caso de muchos transistores, deberá reemplazarse mediante su resistencia interna equivalente cuando se aplique el teorema de superposición.

REPASO DE LA SECCIÓN 8-4

1. Enuncie el teorema de superposición.
2. ¿Por qué el teorema de superposición es útil para analizar circuitos con múltiples fuentes?
3. ¿Por qué se pone en cortocircuito una fuente de voltaje ideal, y una fuente de corriente ideal se abre, cuando se aplica el teorema de superposición?
4. En la figura 8-29, encuentre la corriente a través de R_1 utilizando el teorema de superposición.
5. Si, como resultado de aplicar el teorema de superposición, dos corrientes circulan en direcciones opuestas a través de una rama de un circuito, ¿en qué dirección circula la corriente neta?

▶ FIGURA 8–29



8–5 TEOREMA DE THEVENIN

El teorema de Thevenin proporciona un método para simplificar un circuito a una forma equivalente estándar. Se utiliza para hacer más sencillo el análisis de circuitos complejos.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema de Thevenin para simplificar un circuito para su análisis**
  - Describir la forma de un circuito equivalente de Thevenin
  - Obtener la fuente de voltaje equivalente de Thevenin
  - Obtener la resistencia equivalente de Thevenin

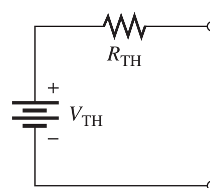
- Explicar el concepto de equivalencia terminal en el contexto del teorema de Thevenin
- Obtener el circuito equivalente de Thevenin de una parte de un circuito
- Obtener el circuito equivalente de un circuito puente

BIOGRAFÍA

Leon Charles Thevenin 1857–1926

Leon Charles Thevenin nació en París, Francia. Se graduó de la Ecole Polytechnique en 1876 y, en 1878, se unió al Corps of Telegraph Engineers donde trabajó inicialmente en el desarrollo de líneas telegráficas subterráneas de larga distancia. Durante su carrera, Thevenin incrementó su interés por los problemas de mediciones en circuitos eléctricos y más tarde desarrolló su famoso teorema, el cual hizo posible desarrollar los cálculos que implican circuitos complejos.

La forma Thevenin equivalente de cualquier circuito resistivo de dos terminales consta de una fuente de voltaje equivalente (V_{TH}) y una resistencia equivalente (R_{TH}), dispuestas como indica la figura 8-30. Los valores del voltaje y de la resistencia equivalentes dependen de los valores del circuito original. Cualquier circuito resistivo puede ser simplificado, pese a su complejidad, con respecto a dos terminales de salida.



◀ **FIGURA 8–30**

La forma general de un circuito equivalente de Thevenin es una fuente de voltaje en serie con una resistencia.

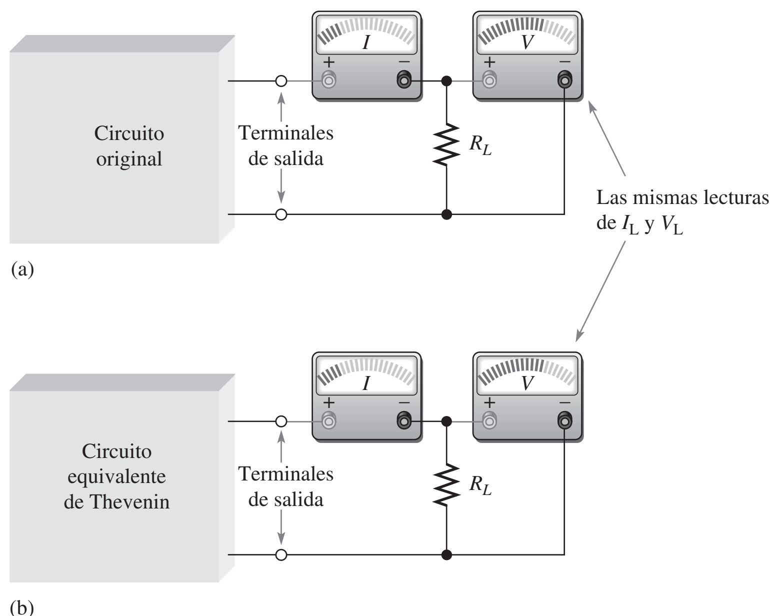
El voltaje equivalente, V_{TH}, es una parte del circuito equivalente de Thevenin completo. La otra parte es R_{TH}.

En un circuito eléctrico, el voltaje equivalente de Thevenin (V_{TH}) es el voltaje de circuito abierto (sin carga) presente entre dos terminales de salida.

Cualquier componente conectado entre estas dos terminales "ve" efectivamente a V_{TH} en serie con R_{TH}. Como lo define el **teorema de Thevenin**,

La resistencia equivalente de Thevenin (R_{TH}) es la resistencia total que aparece entre dos terminales en un circuito dado que tiene todas las fuentes reemplazadas por sus resistencias internas.

Aunque un circuito equivalente de Thevenin no es el mismo que su circuito original, actúa igual en función del voltaje y de la corriente de salida. Intente hacer la siguiente demostración como se ilustra en la figura 8-31. Coloque un circuito resistivo de cualquier complejidad en una caja

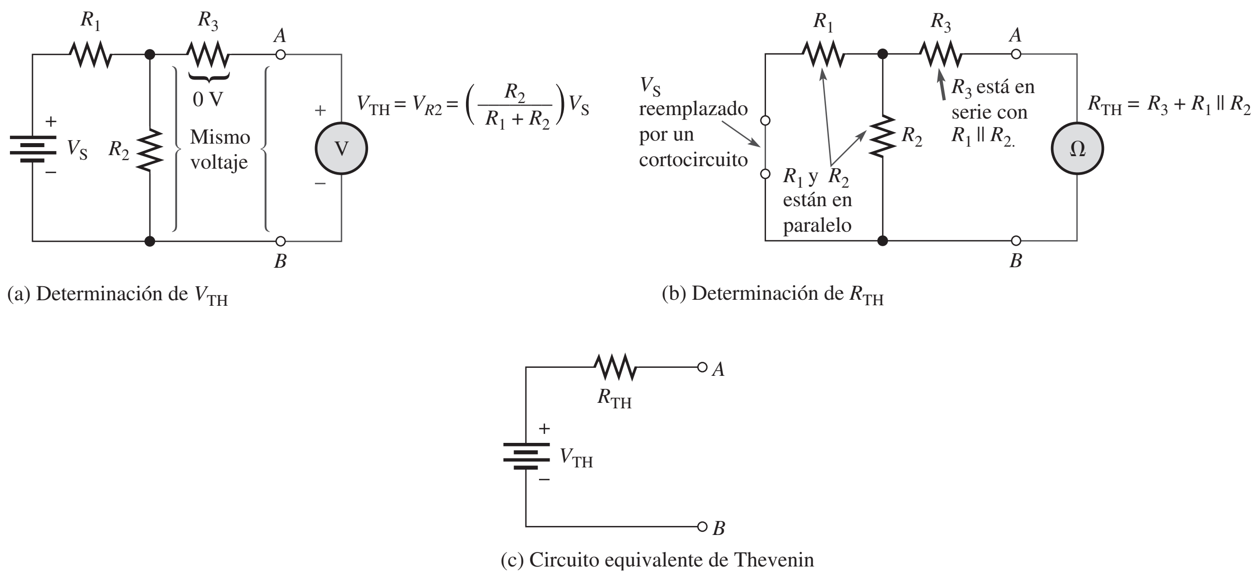


▶ **FIGURA 8–31**

¿Cuál caja contiene el circuito original y cuál el circuito equivalente de Thevenin? No puede decirlo observando los medidores.

con únicamente las terminales de salida expuestas. En seguida se coloca el equivalente de Thevenin de dicho circuito en una caja idéntica con, de nuevo, solamente las terminales de salida expuestas. Se conectan resistores de carga idénticos entre las terminales de salida de cada caja. A continuación se conecta un voltímetro y un amperímetro para medir el voltaje y la corriente con cada una de las cargas como indica la figura. Los valores medidos serán idénticos (omitiendo las variaciones de tolerancia), y no se podrá determinar cuál caja contiene el circuito original y cuál contiene el equivalente de Thevenin. Es decir, en función de las observaciones basadas en cualesquiera mediciones eléctricas, ambos circuitos parecen ser el mismo circuito. Esta condición en ocasiones se conoce como *equivalencia terminal* porque ambos circuitos lucen igual desde el "punto de vista" de las dos terminales de salida.

Para encontrar el equivalente de Thevenin de cualquier circuito, se determina el voltaje equivalente, V_{TH}, y la resistencia equivalente, R_{TH}, vistos desde las terminales de salida. Como un ejemplo, el equivalente de Thevenin para el circuito ubicado entre las terminales A y B se desarrolló en la figura 8-32.



▲ **FIGURA 8–32**

Ejemplo de la simplificación de un circuito mediante el teorema de Thevenin.

En la figura 8-32(a), el voltaje entre las terminales designadas como A y B es el voltaje equivalente de Thevenin. En este circuito particular, el voltaje de A a B es el mismo que se encuentra entre los extremos de R_2 porque a través de R_3 no circula corriente y, por tanto, no hay caída de voltaje en R_3. El voltaje Thevenin se expresa como sigue en este ejemplo particular:

$$V_{TH} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S$$

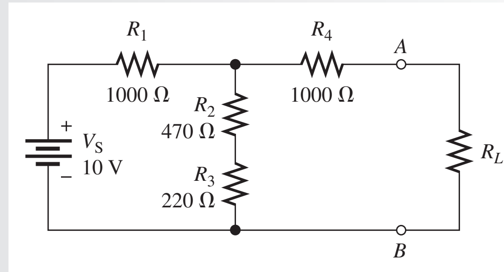
En la figura 8-32(b), la resistencia entre las terminales A y B con la fuente reemplazada por un corto (resistencia interna de cero) es la resistencia equivalente de Thevenin. En este circuito particular, la resistencia de A a B es R_3 en serie con la combinación en paralelo de R_1 y R_2. Por consiguiente, R_{TH} se expresa como sigue:

$$R_{TH} = R_3 + \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}$$

El circuito equivalente de Thevenin se muestra en la figura 8-32(c).

EJEMPLO 8–10 Determine el circuito equivalente de Thevenin entre *A* y *B* del circuito mostrado en la figura 8-33.

▶ **FIGURA 8–33**



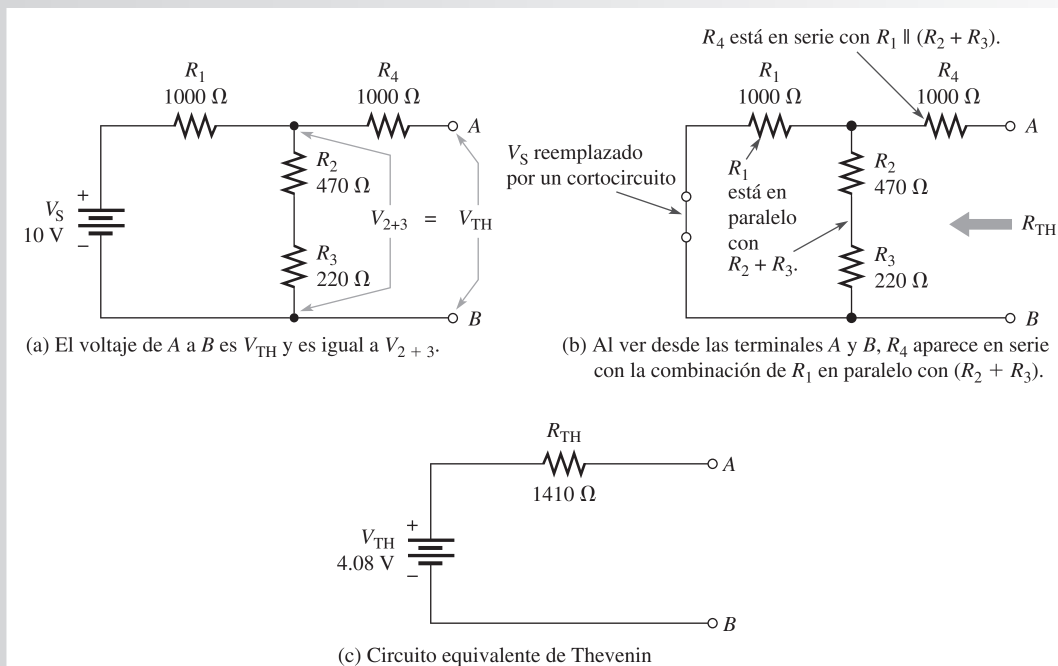
Solución En primer lugar, retire R_L. En tal caso, V_{TH} es igual al voltaje entre los extremos de $R_2 + R_3$ como indica la figura 8-34(a), porque $V_4 = 0$ V puesto que no hay corriente a través de él.

$$V_{TH} = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S = \left(\frac{690\ \Omega}{1690\ \Omega}\right)10\ \text{V} = \mathbf{4.08\ V}$$

Para determinar R_{TH}, primero reemplace la fuente con un corto para simular una resistencia interna de cero. Entonces R_1 aparece en paralelo con $R_2 + R_3$, y R_4 está en serie con la combinación en serie-paralelo de R_1, R_2 y R_3, como se indica en la figura 8-34(b).

$$R_{TH} = R_4 + \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = 1000\ \Omega + \frac{(1000\ \Omega)(690\ \Omega)}{1690\ \Omega} = \mathbf{1410\ \Omega}$$

El circuito equivalente de Thevenin resultante se muestra en la figura 8-34(c).



(a) El voltaje de *A* a *B* es V_{TH} y es igual a V_{2+3}.

(b) Al ver desde las terminales *A* y *B*, R_4 aparece en serie con la combinación de R_1 en paralelo con $(R_2 + R_3)$.

(c) Circuito equivalente de Thevenin

▲ **FIGURA 8–34**

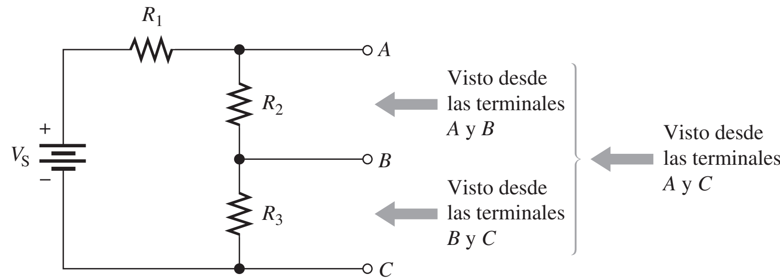
Problema relacionado Determine V_{TH} y R_{TH} si se conecta un resistor de 560 Ω en paralelo entre los extremos de R_2 y R_3.



Use el archivo Multisim E08-10 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

La equivalencia Thevenin dependiendo desde qué terminales es visto

El equivalente de Thevenin de cualquier circuito depende de la ubicación de las dos terminales de salida desde donde se “ve” dicho circuito. En la figura 8-33, el circuito se ve desde entre las dos terminales *A* y *B*. Cualquier circuito dado puede tener más de un equivalente de Thevenin según como estén designadas las terminales de salida. Por ejemplo, si el circuito mostrado en la figura 8-35 se ve desde entre las terminales *A* y *C*, se obtiene un resultado completamente diferente que si se ve desde entre las terminales *A* y *B* o desde entre las terminales *B* y *C*.



◀ FIGURA 8–35

El equivalente de Thevenin depende de las terminales de salida desde las cuales el circuito es visto.

En la figura 8-36(a), cuando el circuito es visto desde entre las terminales *A* y *C*, V_{TH} es el voltaje entre $R_2 + R_3$ y puede ser expresado con la fórmula del divisor de voltaje como

$$V_{TH(AC)} = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S$$

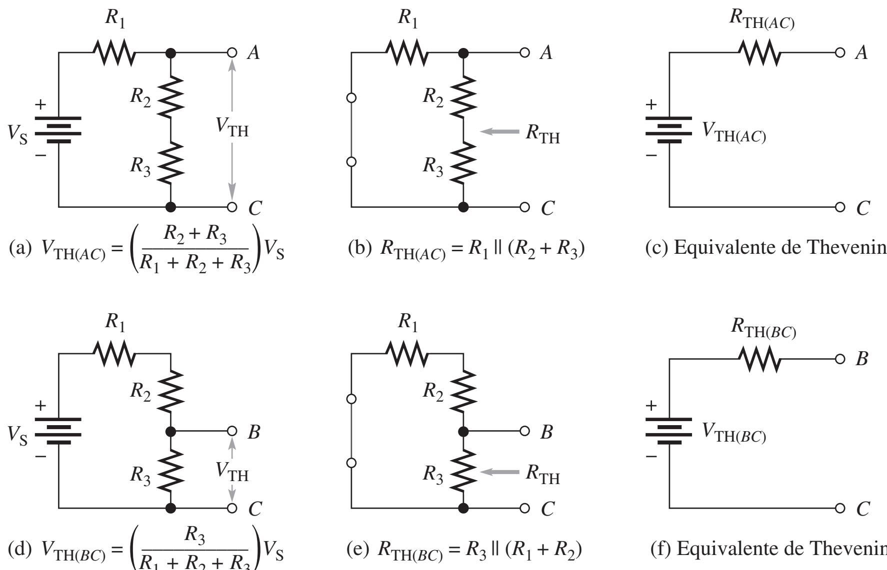
Asimismo, como se muestra en la figura 8-36(b), la resistencia entre las terminales *A* y *C* es $R_2 + R_3$ en paralelo con R_1 (la fuente es reemplazada por un corto) y se expresa como

$$R_{TH(AC)} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

El circuito equivalente de Thevenin resultante se muestra en la figura 8-36(c).

Cuando V_{TH} es visto desde entre las terminales *B* y *C* como indica la figura 8-36(d), V_{TH} es el voltaje entre R_3 y se expresa como

$$V_{TH(BC)} = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S$$



◀ FIGURA 8–36

Ejemplo de un circuito equivalente de Thevenin visto desde dos juegos diferentes de terminales. Las partes (a), (b) y (c) ilustran un juego de terminales, y las partes (d), (e) y (f) ilustran otro juego de terminales. (Los valores V_{TH} y R_{TH} son diferentes en cada caso).

Según muestra la figura 8-36(e), la resistencia entre las terminales B y C es R_3 en paralelo con la combinación en serie de R_1 y R_2.

$$R_{TH(BC)} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

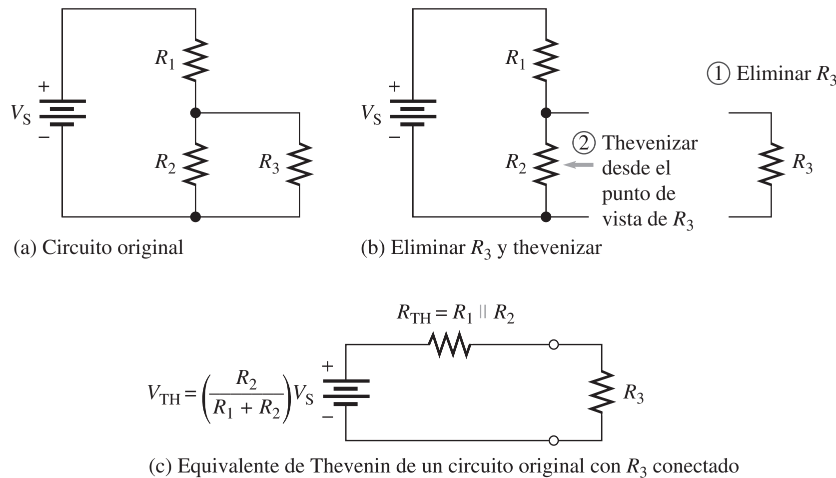
El equivalente de Thevenin resultante se muestra en la figura 8-36(f).

Thevenización de una parte de un circuito

En muchos casos, es de cierta ayuda thevenizar sólo una parte de un circuito. Por ejemplo, cuando se requiere conocer el circuito equivalente como lo ve un resistor en particular presente en el circuito, se puede eliminar el resistor y aplicar el teorema de Thevenin a la parte restante del circuito visto desde los puntos entre los cuales estaba conectado dicho resistor. La figura 8-37 ilustra la thevenización de una parte de un circuito.

▶ FIGURA 8–37

Ejemplo de thevenizar una parte de un circuito. En este caso, el circuito se thevenizó desde el punto de vista del resistor de carga R_3.



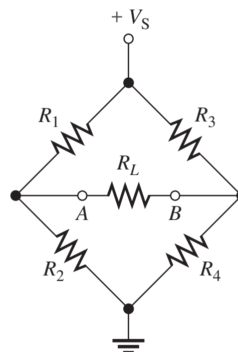
Con este tipo de enfoque, es fácil determinar el voltaje y la corriente en un resistor específico con cualquier número de valores utilizando solamente la ley de Ohm. Este método elimina la necesidad de volver a analizar el circuito original con cada valor de resistencia diferente.

Thevenización de un circuito puente

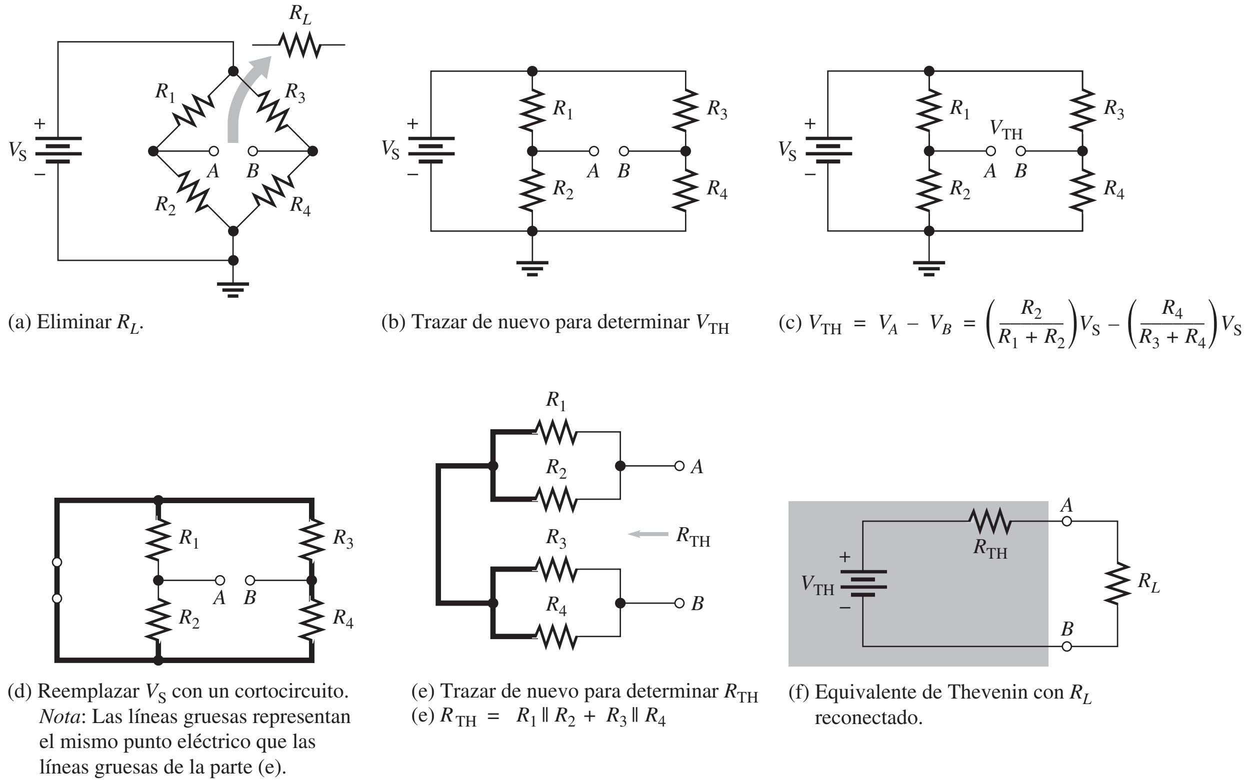
La utilidad del teorema de Thevenin tal vez se ilustra mejor cuando se aplica a un circuito puente Wheatstone. Por ejemplo, cuando se conecta un resistor de carga a las terminales de salida de un puente Wheatstone, como indica la figura 8-38, el circuito resulta difícil de analizar porque no es una configuración en serie-paralelo directa. No hay resistores que estén en serie o en paralelo con otro resistor.

▶ FIGURA 8–38

Un puente Wheatstone con un resistor de carga conectado entre las terminales de salida no es un circuito en serie-paralelo directo.



Con el teorema de Thevenin, se puede simplificar el circuito puente a un circuito equivalente visto desde el resistor de carga según muestra paso a paso la figura 8-39. Estudie con cuidado los pasos presentados en esta figura. Una vez que se encuentra el circuito equivalente, el voltaje y la corriente para cualquier valor del resistor de carga son fáciles de determinar.

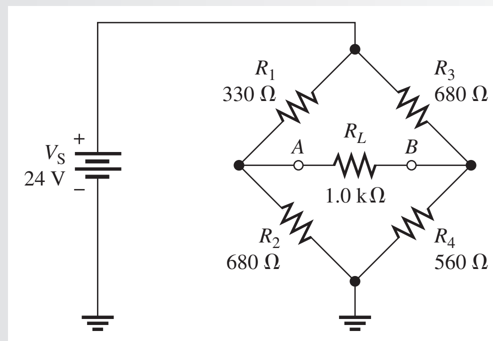


▲ **FIGURA 8–39**

Simplificación de un puente Wheatstone con el teorema de Thevenin.

EJEMPLO 8–11

Determine el voltaje y la corriente para el resistor de carga, R_L, mostrado en el circuito puente de la figura 8-40.



▲ **FIGURA 8–40**

Solución **Paso 1:** Elimine R_L.

Paso 2: Para thevenizar el puente visto desde entre las terminales *A* y *B*, como se mostró en la figura 8-39, primero determine V_{TH}.

$$V_{TH} = V_A - V_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S - \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right)V_S$$

$$= \left(\frac{680\ \Omega}{1010\ \Omega}\right)24\text{ V} - \left(\frac{560\ \Omega}{1240\ \Omega}\right)24\text{ V} = 16.16\text{ V} - 10.84\text{ V} = 5.32\text{ V}$$

Paso 3: Determine R_{TH}.

$$R_{TH} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3R_4}{R_3 + R_4}$$

$$= \frac{(330\ \Omega)(680\ \Omega)}{1010\ \Omega} + \frac{(680\ \Omega)(560\ \Omega)}{1240\ \Omega} = 222\ \Omega + 307\ \Omega = 529\ \Omega$$

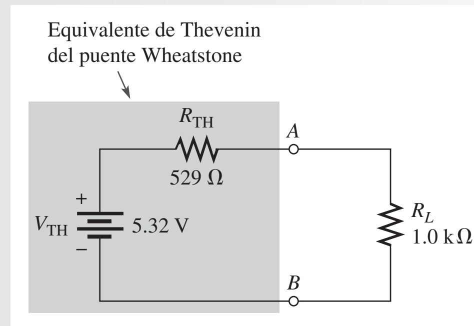
Paso 4: Coloque V_{TH} y R_{TH} en serie para formar el circuito equivalente de Thevenin.

Paso 5: Conecte el resistor de carga entre las terminales *A* y *B* del circuito equivalente, y determine el voltaje y la corriente en la carga como se ilustra en la figura 8-41.

$$V_L = \left(\frac{R_L}{R_L + R_{TH}}\right)V_{TH} = \left(\frac{1.0\text{ k}\Omega}{1.529\text{ k}\Omega}\right)5.32\text{ V} = \mathbf{3.48\ V}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{3.48\text{ V}}{1.0\text{ k}\Omega} = \mathbf{3.48\ mA}$$

▶ **FIGURA 8–41**

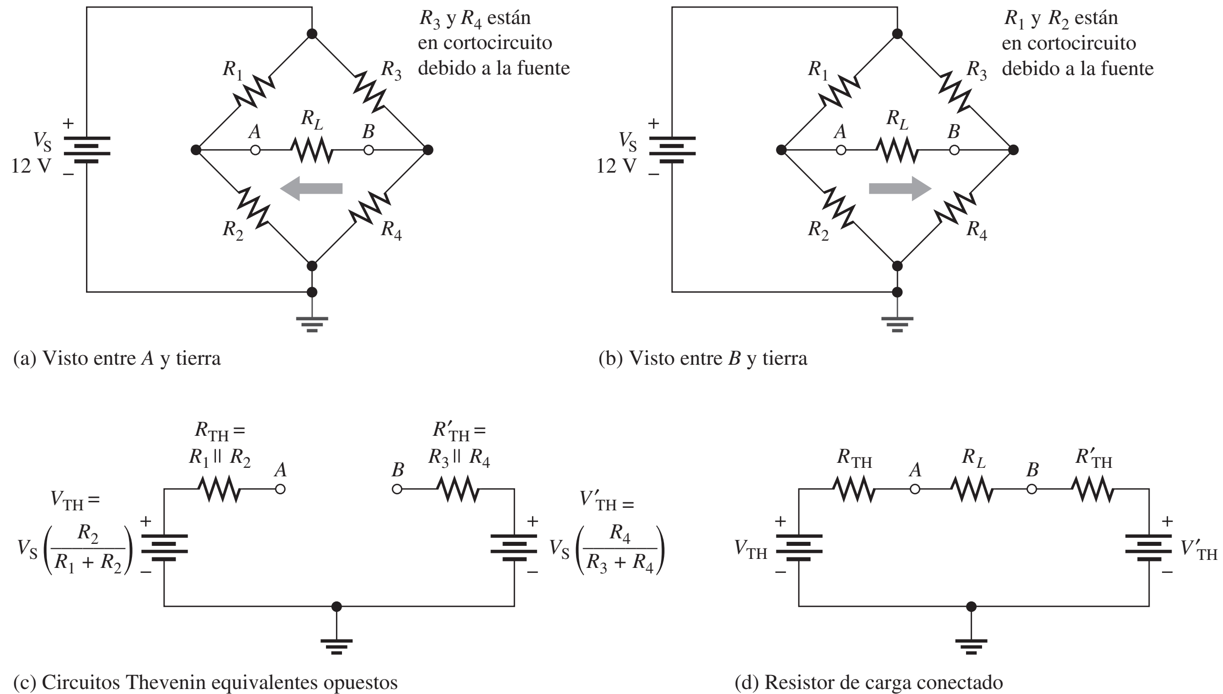


Problema relacionado Calcule I_L para $R_1 = 2.2$ kΩ, $R_2 = 3.3$ kΩ, $R_3 = 3.9$ kΩ, y $R_4 = 2.7$ kΩ.



Use el archivo Multisim E08-11 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

Un método alterno Una forma alterna de thevenizar el puente Wheatstone es considerar un punto de vista diferente. En lugar de verlo desde entre las terminales *A* y *B*, puede ser visto desde la terminal *A* hasta tierra y desde la terminal *B* hasta tierra, como ilustra la figura 8-42(a) y (b). El circuito equivalente resultante se reduce a dos circuitos Thevenin uno frente al otro que aún incluyen la tierra, según muestra la figura 8-42(c). Cuando se calcula la resistencia Thevenin, la fuente de voltaje es reemplazada por un corto; así, dos de los resistores del puente se ponen en cortocircuito. En la figura 8-42(a), R_3 y R_4 están en cortocircuito, y en la parte (b) R_1 y R_2 también están en cortocircuito. En cada caso, los dos resistores restantes aparecen en paralelo para formar la resistencia Thevenin. El resistor de carga puede ser reemplazado como en la figura 8-42(d), el cual se ve como un circuito en serie simple con dos fuentes opuestas. La ventaja de este método es que



(a) Visto entre *A* y tierra

(b) Visto entre *B* y tierra

(c) Circuitos Thevenin equivalentes opuestos

(d) Resistor de carga conectado

▲ FIGURA 8–42

se sigue mostrando la tierra en este circuito equivalente, así que es fácil determinar el voltaje en la terminal *A* o *B* con respecto a tierra aplicando el teorema de superposición al circuito equivalente.

Resumen del teorema de Thevenin

Recuerde que el circuito equivalente de Thevenin *siempre* aparece en la forma de una fuente de voltaje equivalente en serie con una resistencia equivalente haciendo caso omiso del circuito original que reemplaza. La importancia del teorema de Thevenin es que el circuito equivalente puede reemplazar al circuito original en cuanto a cualquier carga externa. Cualquier resistor de carga conectado entre las terminales de un circuito equivalente de Thevenin tendrá la misma corriente a través de él y el mismo voltaje entre sus extremos como si estuviera conectado a las terminales del circuito original.

El siguiente es un resumen de los pasos a seguir para aplicar el teorema de Thevenin:

Paso 1. Abrir las dos terminales (eliminar cualquier carga) entre las que se desea encontrar el circuito equivalente de Thevenin.

Paso 2. Determinar el voltaje (V_{TH}) entre las dos terminales abiertas.

Paso 3. Determinar la resistencia (R_{TH}) entre las dos terminales abiertas con todas las fuentes reemplazadas por sus resistencias internas (fuentes de voltaje ideales en cortocircuito y fuentes de corriente ideales abiertas).

Paso 4. Conectar V_{TH} y R_{TH} en serie para producir el equivalente de Thevenin completo del circuito original.

Paso 5. Reemplazar la carga eliminada en el paso 1 entre las terminales del circuito equivalente de Thevenin. Ahora se pueden calcular la corriente y el voltaje que haya en la carga utilizando solamente la ley de Ohm. Tienen el mismo valor que la corriente y el voltaje presentes en la carga del circuito original.

Determinación de V_{TH} y R_{TH} empleando mediciones

El teorema de Thevenin es en gran medida una herramienta analítica que se aplica teóricamente para simplificar el análisis de circuitos. Sin embargo, se puede encontrar el equivalente de The-

venin de un circuito existente utilizando los siguientes métodos de medición generales. Estos pasos se ilustran en la figura 8-43.

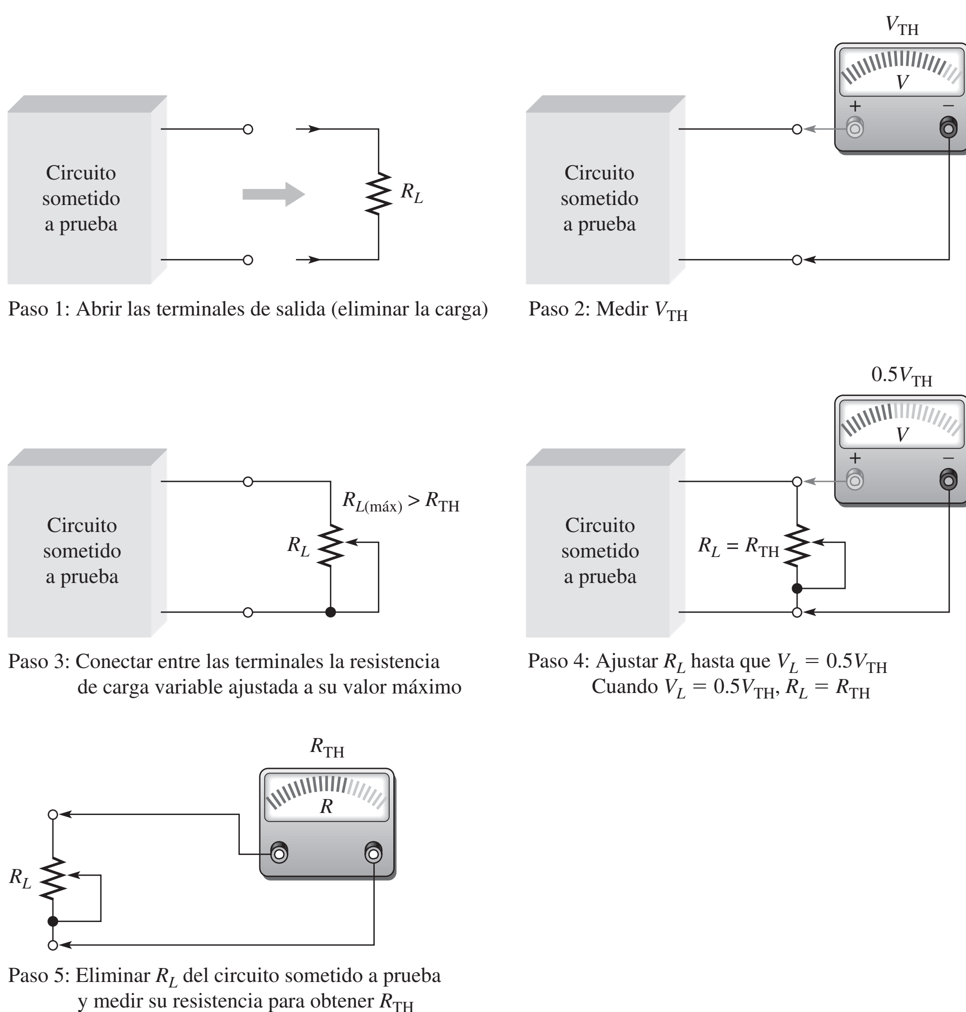
Paso 1. Eliminar cualquier carga de las terminales de salida del circuito.

Paso 2. Medir el voltaje entre las terminales abiertas. El voltímetro utilizado debe tener una resistencia interna mucho más grande (por lo menos 10 veces más grande) que la R_{TH} del circuito, de modo que haya un efecto de carga insignificante. (V_{TH} es el voltaje entre las terminales abiertas).

Paso 3. Conectar un resistor variable (reóstato) entre las terminales de salida. Ajustarlo a su valor máximo, el cual debe ser más grande que R_{TH}.

Paso 4. Ajustar el reóstato hasta que el voltaje entre las terminales sea igual a $0.5V_{TH}$. A estas alturas, la resistencia del reóstato es igual a R_{TH}.

Paso 5. Desconectar el reóstato de las terminales y medir su resistencia con un ohmmetro. La resistencia medida es igual a R_{TH}.



▲ **FIGURA 8–43**

Determinación del equivalente de Thevenin utilizando mediciones.

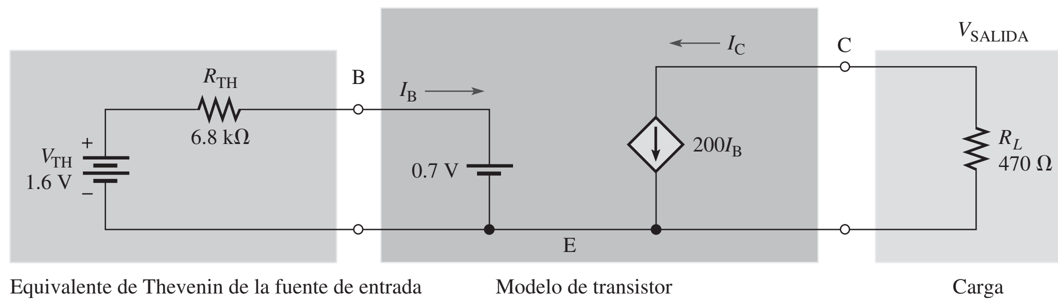
Este procedimiento de determinar R_{TH} difiere del procedimiento teórico porque en un circuito real no es práctico poner en cortocircuito las fuentes de voltaje o abrir las fuentes de corriente. Asimismo, cuando se mide R_{TH}, hay que asegurarse de que el circuito es capaz de suministrar la corriente requerida a la carga de resistor variable y que el resistor variable puede hacerse cargo de la potencia requerida. Estas consideraciones pueden volver poco práctico el procedimiento en algunos casos.

Un ejemplo de aplicación práctica

Aunque todavía no se han estudiado los circuitos transistorizados, se puede utilizar un amplificador básico para ilustrar la utilidad del circuito equivalente de Thevenin. Un circuito de transistor puede ser modelado con componentes básicos, incluidos una fuente de corriente dependiente y un circuito equivalente de Thevenin. El modelado es en general una simplificación matemática de un circuito complejo, que conserva solamente las partes más importantes del circuito y elimina aquellas que tienen sólo un efecto mínimo.

Un modelo de cd típico de un transistor se muestra en la figura 8-44. Este tipo de transistor (transistor de unión bipolar) tiene tres terminales, designadas como base (B), colector (C), y emisor (E). En este caso, la terminal emisor es tanto una entrada como una salida, por lo que es común. La fuente de corriente dependiente (símbolo en forma de diamante) es controlada por la corriente de base, I_B. En este ejemplo, la corriente producida por la fuente dependiente es 200 veces más grande que la corriente de base como lo expresa el término βI_B, donde β es un parámetro de ganancia de transistor y, en este caso, $\beta = 200$.

El transistor es una parte del circuito amplificador de cd, y se puede utilizar el modelo básico para predecir la corriente de salida. La corriente de salida es más grande que la que el circuito de entrada puede proporcionar por sí solo. Por ejemplo, la fuente puede representar un pequeño transductor, tal como una celda solar con resistencia interna de 6.8 kΩ. Se muestra como un voltaje equivalente de Thevenin y una resistencia Thevenin. La carga podría ser cualquier dispositivo que requiera una corriente más alta de la que la fuente puede proporcionar directamente.



▲ **FIGURA 8–44**

Circuito de cd de transistor. El símbolo en forma de rombo indica una fuente de corriente dependiente.

EJEMPLO 8–12

(a) Escriba la ley del voltaje de Kirchhoff alrededor de la parte izquierda del circuito mostrado en la figura 8-44. Resuelva para I_B.

(b) Determine la corriente suministrada por la fuente de corriente dependiente. Esta corriente es I_C.

(c) Calcule el voltaje de salida y la potencia en el resistor de carga R_L.

(d) Compare la potencia determinada en (c) con la potencia suministrada a la carga si el resistor de carga estuviera conectado directamente al circuito Thevenin.

Solución

(a) $V_{TH} - R_{TH}I_B - 0.7\text{ V} = 0$

$$I_B = \frac{V_{TH} - 0.7\text{ V}}{R_{TH}} = \frac{1.6\text{ V} - 0.7\text{ V}}{6.8\text{ k}\Omega} = \mathbf{132\ \mu A}$$

(b) $I_C = \beta I_B = 200(132\ \mu\text{A}) = \mathbf{26.5\ mA}$

(c) $V_{SALIDA} = I_C R_L = (26.5\text{ mA})(470\ \Omega) = \mathbf{12.4\ V}$

$$P_L = \frac{V_{SALIDA}^2}{R_L} = \frac{(12.4\text{ V})^2}{470\ \Omega} = \mathbf{327\ mW}$$

(d) $P_L = I_B^2 R_L = (132\ \mu\text{A})^2(470\ \Omega) = 8.19\ \mu\text{W}$

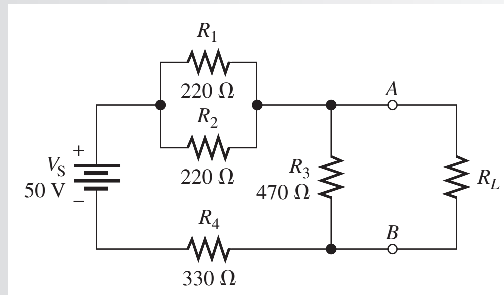
En el resistor de carga la potencia es de 327 mW/8.19 μW = 39,927 veces más grande que la potencia que el circuito de entrada Thevenin podría suministrar a la misma carga. Esto ilustra que el transistor puede operar como amplificador de potencia.

Problema relacionado Determine el voltaje de entrada en la base (B) del transistor. Compare este valor con V_{SALIDA}. ¿En cuánto incrementa el amplificador el voltaje de entrada?

REPASO DE LA SECCIÓN 8-5

1. ¿Cuáles son los componentes de un circuito equivalente de Thevenin?
2. Trace la forma general de un circuito equivalente de Thevenin.
3. ¿Cómo se define V_{TH}?
4. ¿Cómo se define R_{TH}?
5. Para el circuito original mostrado en la figura 8-45, dibuje el circuito equivalente de Thevenin visto desde las terminales de salida *A* y *B*.

▶ FIGURA 8–45

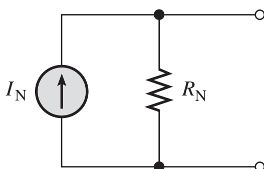


8–6 TEOREMA DE NORTON

Al igual que el teorema de Thevenin, el teorema de Norton proporciona un método para reducir un circuito más complejo a una forma equivalente más simple. La diferencia básica es que el teorema de Norton da por resultado una fuente de corriente equivalente en paralelo con una resistencia equivalente.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema de Norton para simplificar un circuito**
  - Describir la forma de un circuito equivalente Norton
  - Obtener la fuente de corriente equivalente Norton
  - Obtener la resistencia equivalente Norton



▲ FIGURA 8–46

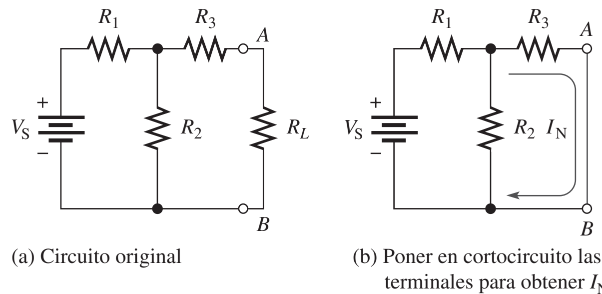
Forma de un circuito equivalente de Norton.

El **teorema de Norton** es un método empleado para simplificar un circuito lineal de dos terminales en un circuito equivalente con sólo una fuente de corriente en paralelo con un resistor. La forma del circuito equivalente de Norton se muestra en la figura 8-46. Sin importar cuán complejo es el circuito de dos terminales original, siempre puede ser reducido a esta forma equivalente. La fuente de corriente equivalente se designa como I_N, y la resistencia equivalente como R_N. Para aplicar el teorema de Norton, se debe saber cómo determinar las dos cantidades I_N y R_N. Una vez que se las determina para un circuito, simplemente se conectan en paralelo para obtener el circuito Norton completo.

Corriente equivalente de Norton (I_N)

La corriente equivalente de Norton (I_N) es la corriente que se encuentra en cortocircuito entre dos terminales de salida de un circuito.

Cualquier componente conectado entre estas dos terminales "ve" efectivamente una fuente de corriente I_N en paralelo con R_N. Como ilustración, suponga que un circuito resistivo de cierta clase tiene un resistor (R_L) conectado entre dos terminales de salida en el circuito, según muestra la figura 8-47(a). Se desea determinar el circuito Norton equivalente al mostrado como es "visto" por R_L. Para determinar I_N, encuentre la corriente entre las terminales A y B con estas dos terminales en cortocircuito, como indica la figura 8-47(b). El ejemplo 8-13 demuestra cómo encontrar I_N.

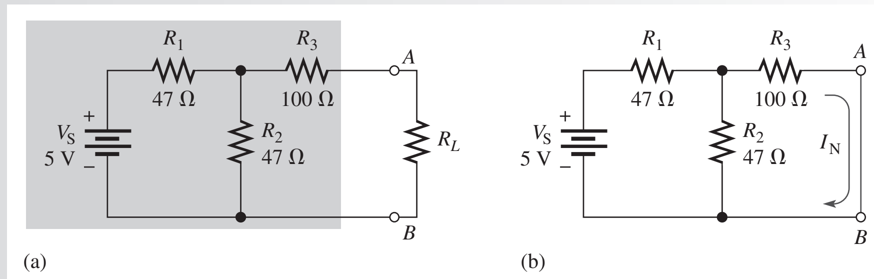


◀ **FIGURA 8–47**

Determinación de la corriente equivalente Norton, I_N.

EJEMPLO 8–13 Determine I_N para el circuito localizado dentro del área sombreada en la figura 8-48(a).

▶ **FIGURA 8–48**



Solución Ponga en cortocircuito las terminales A y B como se muestra en la figura 8-48(b). I_N es la corriente que circula a través del cortocircuito. En primer lugar, la resistencia total vista por la fuente de voltaje es

$$R_T = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 47\ \Omega + \frac{(47\ \Omega)(100\ \Omega)}{147\ \Omega} = 79\ \Omega$$

La corriente total producida por la fuente es

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{5\ \text{V}}{79\ \Omega} = 63.3\ \text{mA}$$

Ahora aplique la fórmula del divisor de corriente para determinar I_N (la corriente a través del cortocircuito).

$$I_N = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right) I_T = \left(\frac{47\ \Omega}{147\ \Omega}\right) 63.3\ \text{mA} = \mathbf{20.2\ mA}$$

Este es el valor para la fuente de corriente Norton equivalente.

Problema relacionado En la figura 8-48(a), determine I_N si el valor de R_2 se duplica.



Use el archivo Multisim E08-13 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Resistencia equivalente de Norton (R_N)

La resistencia equivalente de Norton (R_N) se define de igual modo que R_{TH}.

La resistencia equivalente de Norton, R_N, es la resistencia total que aparece entre dos terminales de salida en un circuito dado que tiene todas las fuentes reemplazadas por sus resistencias internas.

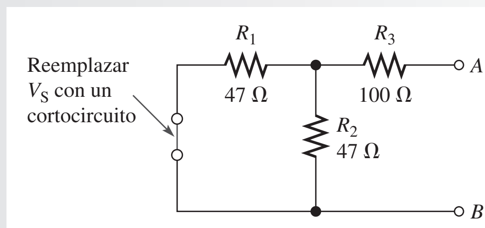
El ejemplo 8-14 demuestra cómo determinar R_N.

EJEMPLO 8–14 Encuentre R_N para el circuito localizado dentro del área sombreada de la figura 8-48(a) (vea el ejemplo 8-13).

Solución Primero reduzca V_S a cero poniéndola en cortocircuito, como indica la figura 8-49. Examinando las terminales *A* y *B*, se advierte que la combinación en paralelo de R_1 y R_2 está en serie con R_3. Por tanto,

$$R_N = R_3 + \frac{R_1}{2} = 100\ \Omega + \frac{47\ \Omega}{2} = \mathbf{124\ \Omega}$$

▶ **FIGURA 8–49**



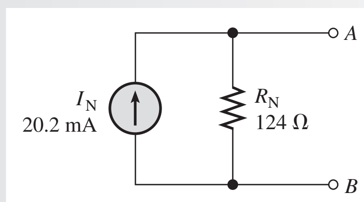
Problema relacionado En la figura 8-48(a), determine R_N si el valor de R_2 se duplica.

Los ejemplos 8-13 y 8-14 demostraron cómo se determinan los dos componentes equivalentes de un circuito equivalente Norton, I_N y R_N. Tenga en cuenta que estos valores pueden ser determinados para cualquier circuito lineal. Una vez conocidos dichos valores, se conectan en paralelo para formar el circuito equivalente Norton, tal como ilustra el ejemplo 8-15.

EJEMPLO 8–15 Dibuje el circuito equivalente Norton completo para el circuito original mostrado en la figura 8-48(a) (Ejemplo 8-13).

Solución En los ejemplos 8-13 y 8-14 se encontró que $I_N = 20.2$ mA y $R_N = 124\ \Omega$. El circuito equivalente Norton se muestra en la figura 8-50.

▶ **FIGURA 8–50**



Problema relacionado Para el circuito de la figura 8-48(a), determine R_N si todos los valores de resistor se duplican.

Resumen del teorema de Norton

Cualquier resistor de carga conectado entre las terminales de salida de un circuito equivalente Norton tendrá la misma corriente a través de él y el mismo voltaje entre sus terminales como si estuviera conectado a las terminales de salida del circuito original. A continuación se da un resumen de los pasos necesarios para la aplicación teórica del teorema de Norton:

Paso 1. Poner con cortocircuito las dos terminales entre la cuales se desea determinar el circuito equivalente de Norton.

Paso 2. Determinar la corriente (I_N) a través de las terminales puestas en cortocircuito.

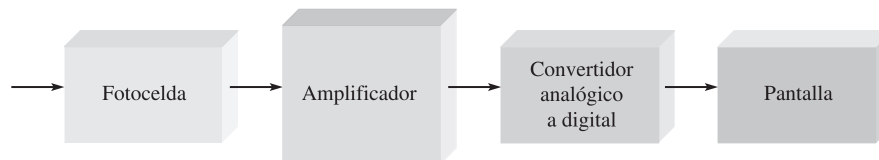
Paso 3. Determinar la resistencia (R_N) entre las dos terminales abiertas con todas las fuentes reemplazadas por sus resistencias internas (fuentes de voltaje ideales en cortocircuito y fuentes de corriente ideales abiertas). $R_N = R_{TH}$.

Paso 4. Conectar I_N y R_N en paralelo para producir el circuito equivalente de Norton completo para el circuito original.

El circuito equivalente de Norton también puede ser producido a partir del circuito equivalente de Thevenin utilizando el método de conversión de fuente analizado en la sección 8-3.

Ejemplo de una aplicación práctica

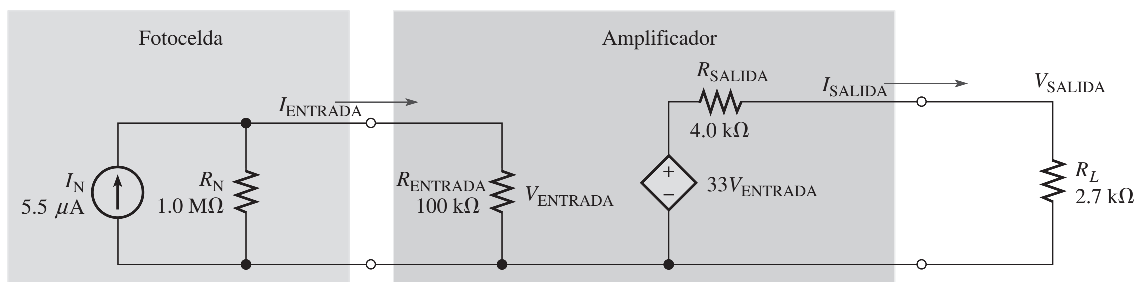
En un medidor de luz digital, un amplificador de voltaje se modela utilizando el circuito equivalente de Norton y una fuente de voltaje dependiente. En la figura 8-51 se muestra un diagrama de bloques del medidor de luz, el cual utiliza una fotocelda como sensor. Ésta es una fuente de corriente que produce una corriente muy pequeña proporcional a la luz incidente. Como es una fuente de corriente, se utiliza un circuito Norton para modelar la fotocelda. La muy pequeña cantidad de corriente producida por la fotocelda se transforma en un pequeño voltaje de entrada a través de R_N. Se utiliza un amplificador de cd para incrementar el voltaje a un nivel suficiente como para excitar el convertidor analógico a digital y desplegar la información en un display.



◀ **FIGURA 8–51**

Diagrama de bloques de un medidor de luz.

En esta aplicación, solamente los primeros dos bloques del diagrama del medidor de luz son de interés. Éstos se modelaron como indica la figura 8-52. La fotocelda se modeló como un circuito Norton en la entrada. La salida del circuito Norton es alimentada hacia la resistencia de entrada del amplificador, la cual convierte la corriente I_N en un pequeño voltaje $V_{ENTRADA}$. El amplificador incrementa este voltaje en 33 para excitar el convertidor analógico a digital, el que, por simplicidad, se modela simplemente como un resistor de carga, R_L. El valor de 33 es la ganancia de este amplificador en particular.



▲ **FIGURA 8–52**

Modelo de fotocelda y amplificador. El símbolo en forma de diamante indica una fuente de voltaje dependiente.

EJEMPLO 8–16 Consulte la figura 8-52.

(a) Aplique la regla del divisor de corriente al circuito Norton de entrada para calcular I_{ENTRADA}.

(b) Use la ley de Ohm para calcular V_{ENTRADA}.

(c) Determine el voltaje producido por la fuente de voltaje dependiente. Esta ganancia es de 33.

(d) Aplique la regla del divisor de voltaje para calcular V_{SALIDA}.

Solución

(a) $I_{\text{ENTRADA}} = I_{\text{N}}\left(\dfrac{R_{\text{N}}}{R_{\text{N}} + R_{\text{ENTRADA}}}\right) = (5.5\ \mu\text{A})\left(\dfrac{1.0\ \text{M}\Omega}{1.1\ \text{M}\Omega}\right) = \mathbf{5\ \mu A}$

(b) $V_{\text{ENTRADA}} = I_{\text{ENTRADA}}R_{\text{ENTRADA}} = (5\ \mu\text{A})(100\ \text{k}\Omega) = \mathbf{0.5\ V}$

(c) $33V_{\text{ENTRADA}} = (33)(0.5\ \text{V}) = \mathbf{16.5\ V}$

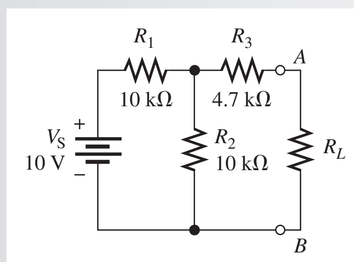
(d) $V_{\text{SALIDA}} = (33\ V_{\text{ENTRADA}})\left(\dfrac{R_L}{R_L + R_{\text{SALIDA}}}\right) = (16.5\ \text{V})(0.403) = \mathbf{6.65\ V}$

Problema relacionado Si la fotocelda es reemplazada por una que tenga la misma corriente pero una resistencia equivalente Norton de 2.0 MΩ, ¿cuál es el voltaje de salida?

REPASO DE LA SECCIÓN 8-6

1. **¿Cuáles son los dos componentes del circuito equivalente de Norton?**
2. **Trace la forma general de un circuito equivalente de Norton.**
3. **¿Cómo se define I_{N}?**
4. **¿Cómo se define R_{N}?**
5. **Determine el circuito Norton visto por R_{L} en la figura 8-53.**

▶ **FIGURA 8–53**



8–7 TEOREMA DE TRANSFERENCIA DE POTENCIA MÁXIMA

El teorema de transferencia de potencia máxima es importante cuando se tiene que conocer el valor de la carga con la cual la fuente suministra la máxima potencia.

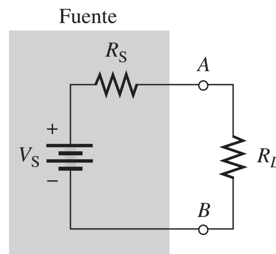
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema de transferencia de potencia máxima**
  - Enunciar el teorema
  - Determinar el valor de la resistencia de carga con la cual se transfiere la potencia máxima desde un circuito dado

El **teorema de transferencia** de potencia máxima se fórmula como sigue:

Para una fuente de voltaje dada, la potencia máxima se transfiere desde una fuente hasta una carga cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia interna de la fuente.

La resistencia de la fuente, R_S, de un circuito es la resistencia equivalente vista desde la terminal de salida utilizando el teorema de Thevenin. En la figura 8-54 se muestra un circuito equivalente de Thevenin con su resistencia y su carga de salida. Cuando $R_L = R_S$, la potencia máxima posible se transfiere desde la fuente de voltaje hasta R_L con un valor dado de V_S.



◀ **FIGURA 8–54**

Se transfiere potencia máxima a la carga cuando $R_L = R_S$.

Algunas aplicaciones prácticas del teorema de transferencia de potencia máxima incluyen sistemas de audio tales como aparatos estereofónicos, radios, y sistemas de alocución pública. En estos sistemas la resistencia del altavoz es la carga. El circuito que excita el altavoz es un amplificador de potencia. Típicamente, los sistemas se optimizan para que suministren la máxima potencia a los altavoces. Por tanto, la resistencia de éstos debe ser igual a la resistencia interna de la fuente del amplificador.

El ejemplo 8-17 muestra que la potencia máxima ocurre cuando $R_L = R_S$.

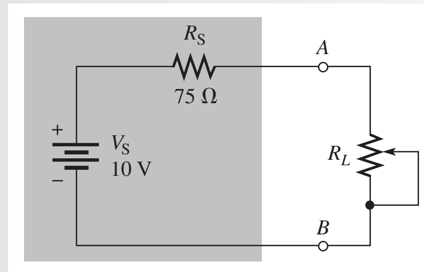
EJEMPLO 8–17

La fuente mostrada en la figura 8-55 tiene una resistencia interna de 75 Ω. Determine la potencia suministrada a la carga con cada uno de los siguientes valores de resistencia de carga:

(a) 0 Ω **(b)** 25 Ω **(c)** 50 Ω **(d)** 75 Ω **(e)** 100 Ω **(f)** 125 Ω

Trace una gráfica que muestre la potencia suministrada a la carga contra la resistencia de carga.

▶ **FIGURA 8–55**



Solución Use la ley de Ohm ($I = V/R$) y la fórmula de la potencia ($P = I^2R$) para determinar la potencia suministrada a la carga, P_L, con cada uno de los valores de resistencia de carga.

(a) Para $R_L = 0\ \Omega$

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{ V}}{75\ \Omega + 0\ \Omega} = 133\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (133\text{ mA})^2(0\ \Omega) = \mathbf{0\ mW}$$

(b) Para $R_L = 25\ \Omega$,

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{ V}}{75\ \Omega + 25\ \Omega} = 100\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (100\text{ mA})^2(25\ \Omega) = \mathbf{250\ mW}$$

(c) Para $R_L = 50\ \Omega$,

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{ V}}{125\ \Omega} = 80\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (80\text{ mA})^2(50\ \Omega) = \mathbf{320\ mW}$$

(d) Para $R_L = 75\ \Omega$,

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{ V}}{150\ \Omega} = 66.7\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (66.7\text{ mA})^2(75\ \Omega) = \mathbf{334\ mW}$$

(e) Para $R_L = 100\ \Omega$,

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{ V}}{175\ \Omega} = 57.1\text{ mA}$$

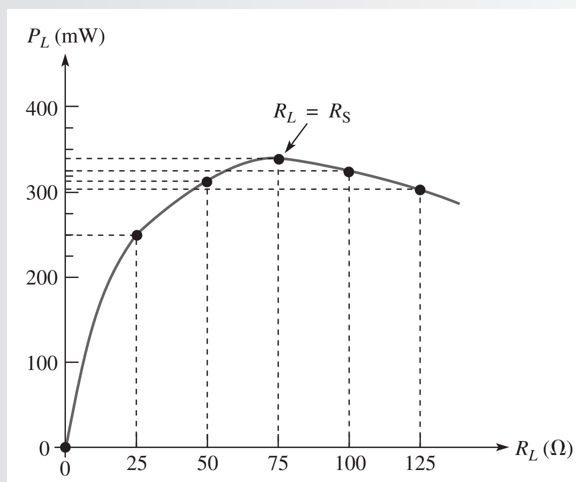
$$P_L = I^2R_L = (57.1\text{ mA})^2(100\ \Omega) = \mathbf{326\ mW}$$

(f) Para $R_L = 125\ \Omega$,

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{ V}}{200\ \Omega} = 50\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (50\text{ mA})^2(125\ \Omega) = \mathbf{313\ mW}$$

Observe que la potencia de carga es máxima cuando $R_L = 75\ \Omega$, que es igual a la resistencia interna de la fuente. Cuando la resistencia de la carga es menor o mayor que este valor, la potencia se reduce, según ilustra gráficamente la curva mostrada en la figura 8-56.



▲ **FIGURA 8–56**

Curva para mostrar que la potencia de carga es máxima cuando $R_L = R_S$.

Problema relacionado Si en la figura 8-55 la resistencia de la fuente es de 600 Ω, ¿cuál es la potencia máxima que puede ser suministrada a una carga?

REPASO DE LA SECCIÓN 8-7

1. Enuncie el teorema de transferencia de potencia máxima.
2. ¿Cuándo se transfiere la potencia máxima de una fuente a una carga?
3. Un circuito dado tiene una resistencia interna de fuente de 50 Ω. ¿Cuál será el valor de la carga a la cual se suministra la potencia máxima?

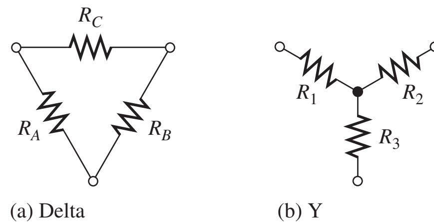
8–8 CONVERSIONES DELTA A Y (Δ A Y) Y Y A DELTA (Y A Δ)

Las conversiones entre configuraciones de circuito tipo delta y tipo Y son útiles en ciertas aplicaciones especializadas de tres terminales. Un ejemplo se encuentra en el análisis de un circuito puente Wheatstone con carga.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Realizar conversiones Δ a Y y Y a Δ**
  - Aplicar la conversión Δ a Y a un circuito puente

Un circuito resistivo delta (Δ)es una configuración de tres terminales como se muestra en la figura 8-57(a). La figura 8-57(b) ilustra un circuito Y. Observe que se utilizan subíndices de letra para designar los resistores presentes en el circuito delta y subíndices numéricos para designar los resistores presentes en el circuito Y.



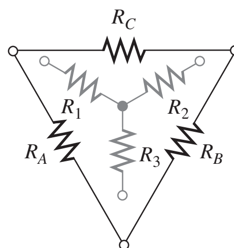
◀ **FIGURA 8–57**

Circuitos delta y Y.

Conversión Δ a Y

Es conveniente pensar en la Y colocada dentro de la delta, como se muestra en la figura 8-58. Para convertir de delta a Y, se requieren R_1, R_2 y R_3 en función de R_A, R_B y R_C. La regla de conversión es como sigue:

Cada resistor localizado en la Y es igual al producto de los resistores incluidos en dos ramas delta adyacentes, dividido entre la suma de los tres resistores en delta.



◀ **FIGURA 8–58**

La “Y adentro de Δ” ayuda en las fórmulas de conversión.

En la figura 8-58, R_A y R_C son adyacentes a R_1; por consiguiente

Ecuación 8–1

$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

Asimismo, R_B y R_C son adyacentes a R_2, por tanto

Ecuación 8–2

$$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

y R_A y R_B son adyacentes a R_3, por tanto

Ecuación 8–3

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C}$$

Conversión Y a Δ

Para convertir de Y a delta, R_A, R_B y R_C se requieren en función de R_1, R_2 y R_3. La regla de conversión es la siguiente:

Cada resistor incluido en la delta es igual a la suma de todos los posibles productos de resistores Y tomados dos a la vez, y divididos entre el resistor Y opuesto.

En la figura 8-58, R_2 es opuesto a R_A; por consiguiente,

Ecuación 8–4

$$R_A = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_2}$$

Asimismo, R_1 es opuesto a R_B, por tanto

Ecuación 8–5

$$R_B = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_1}$$

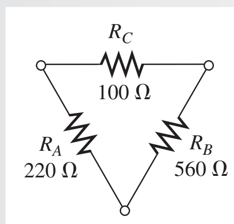
y R_3 es opuesto a R_C, por tanto

Ecuación 8–6

$$R_C = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_3}$$

EJEMPLO 8–18 Convierta el circuito delta mostrado en la figura 8-59 en un circuito Y.

▶ FIGURA 8–59



Solución Use las ecuaciones 8-1, 8-2, y 8-3.

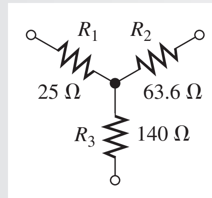
$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(220\ \Omega)(100\ \Omega)}{220\ \Omega + 560\ \Omega + 100\ \Omega} = \mathbf{25\ \Omega}$$

$$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(560\ \Omega)(100\ \Omega)}{880\ \Omega} = \mathbf{63.6\ \Omega}$$

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(220\ \Omega)(560\ \Omega)}{880\ \Omega} = \mathbf{140\ \Omega}$$

El circuito Y resultante se muestra en la figura 8-60.

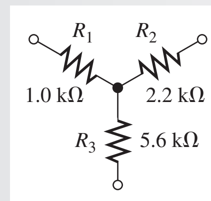
▶ FIGURA 8–60



Problema relacionado Convierta el circuito delta en una red en Y con $R_4 = 2.2\ \text{k}\Omega$, $R_B = 1.0\ \text{k}\Omega$, y $R_C = 1.8\ \text{k}\Omega$.

EJEMPLO 8–19 Convierta el circuito Y de la figura 8-61 en un circuito delta.

▶ FIGURA 8–61



Solución Use las ecuaciones 8-4, 8-5, y 8-6,

$$R_A = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_2}$$

$$= \frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega) + (1.0\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega) + (2.2\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega)}{2.2\ \text{k}\Omega} = \mathbf{9.15\ k\Omega}$$

$$R_B = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_1}$$

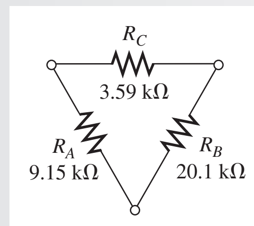
$$= \frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega) + (1.0\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega) + (2.2\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega)}{1.0\ \text{k}\Omega} = \mathbf{20.1\ k\Omega}$$

$$R_C = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_3}$$

$$= \frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2.2\ \text{k}\Omega) + (1.0\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega) + (2.2\ \text{k}\Omega)(5.6\ \text{k}\Omega)}{5.6\ \text{k}\Omega} = \mathbf{3.59\ k\Omega}$$

El circuito delta resultante se muestra en la figura 8-62.

▶ FIGURA 8–62

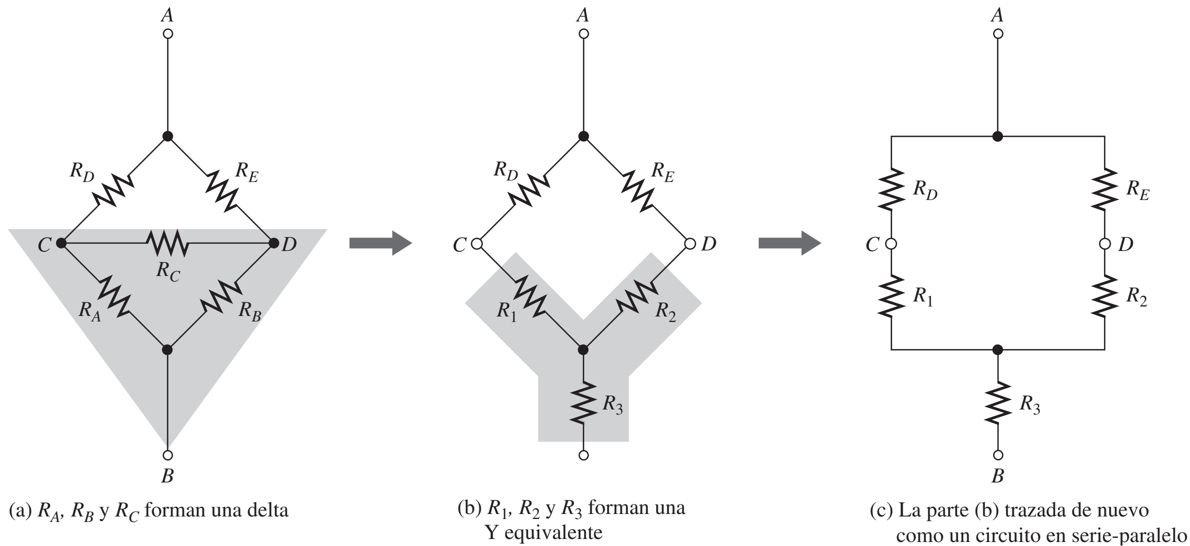


Problema relacionado Convierta el circuito Y en un circuito delta con $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 330\ \Omega$, y $R_3 = 470\ \Omega$.

Aplicación de una conversión Δ a Y a un circuito puente

En la sección 8-5 se aprendió cómo utilizar el teorema de Thevenin para simplificar un circuito puente. Ahora se verá cómo se utiliza la conversión Δ a Y para convertir un circuito puente en una forma en serie-paralelo con el propósito de facilitar su análisis.

La figura 8-63 ilustra cómo la delta (Δ) formada por R_A, R_B y R_C se convierte en una Y, con lo que se crea un circuito en serie-paralelo equivalente. En esta conversión se aplican las ecuaciones 8-1, 8-2, y 8-3.



▲ **FIGURA 8–63**

Conversión de un circuito puente en una configuración en serie-paralelo.

En un circuito puente, la carga se conecta entre las terminales *C* y *D*. En la figura 8-63(a), R_C representa el resistor de carga. Cuando se aplica voltaje entre las terminales *A* y *B*, el voltaje de *C* a *D* (V_{CD}) se determina utilizando el circuito en serie-paralelo equivalente mostrado en la figura 8-63(c) como sigue. La resistencia total desde la terminal *A* hasta la terminal *B* es

$$R_T = \frac{(R_1 + R_D)(R_2 + R_E)}{(R_1 + R_D) + (R_2 + R_E)} + R_3$$

Luego,

$$I_T = \frac{V_{AB}}{R_T}$$

La resistencia de la parte en paralelo del circuito mostrado en la figura 8-63(c) es

$$R_{T(p)} = \frac{(R_1 + R_D)(R_2 + R_E)}{(R_1 + R_D) + (R_2 + R_E)}$$

La corriente que circula a través de la rama izquierda es

$$I_{AC} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_1 + R_D}\right)I_T$$

La corriente que circula a través de la rama derecha es

$$I_{AD} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_2 + R_E}\right)I_T$$

El voltaje presente en la terminal *C* con respecto a la terminal *A* es

$$V_{CA} = V_A - I_{AC}R_D$$

El voltaje presente en la terminal *D* con respecto a la terminal *A* es

$$V_{DA} = V_A - I_{AD}R_E$$

El voltaje desde la terminal *C* hasta la terminal *D* es

$$V_{CD} = V_{CA} - V_{DA}$$
$$= (V_A - I_{AC}R_D) - (V_A - I_{AD}R_E) = I_{AD}R_E - I_{AC}R_D$$

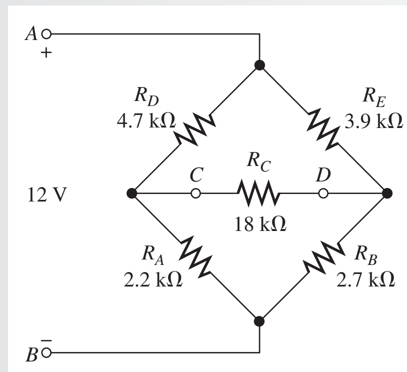
V_{CD} es el voltaje presente entre los extremos de la carga (R_C) en el circuito puente de la figura 8-63(a).

La corriente de carga que circula a través de R_C puede calcularse mediante la ley de Ohm.

$$I_{R_C} = \frac{V_{CD}}{R_C}$$

EJEMPLO 8–20 Determine el voltaje presente entre los extremos del resistor de carga y la corriente que circula a través de sus extremos en el circuito puente de la figura 8-64. Observe que los resistores se designaron pensando en su conversión conveniente mediante las ecuaciones 8-1, 8-2, y 8-3. R_C es el resistor de carga.

▶ **FIGURA 8–64**



Solución Primero, convierta la delta formada por R_A, R_B y R_C en una Y.

$$R_1 = \frac{R_AR_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(2.2\text{ k}\Omega)(18\text{ k}\Omega)}{2.2\text{ k}\Omega + 2.7\text{ k}\Omega + 18\text{ k}\Omega} = 1.73\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_BR_C}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(2.7\text{ k}\Omega)(18\text{ k}\Omega)}{22.9\text{ k}\Omega} = 2.12\text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_AR_B}{R_A + R_B + R_C} = \frac{(2.2\text{ k}\Omega)(2.7\text{ k}\Omega)}{22.9\text{ k}\Omega} = 259\ \Omega$$

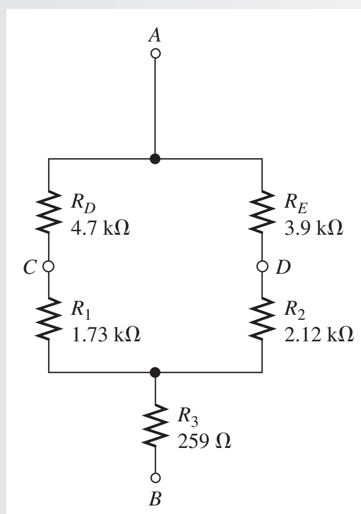
El circuito en serie-paralelo equivalente resultante se muestra en la figura 8-65.

A continuación, determine R_T y las corrientes de rama en la figura 8-65.

$$R_T = \frac{(R_1 + R_D)(R_2 + R_E)}{(R_1 + R_D) + (R_2 + R_E)} + R_3$$

$$= \frac{(6.43\text{ k}\Omega)(6.02\text{ k}\Omega)}{6.43\text{ k}\Omega + 6.02\text{ k}\Omega} + 259\ \Omega = 3.11\text{ k}\Omega + 259\ \Omega = 3.37\text{ k}\Omega$$

$$I_T = \frac{V_{AB}}{R_T} = \frac{12\text{ V}}{3.37\text{ k}\Omega} = 3.56\text{ mA}$$



▲ **FIGURA 8–65**

La resistencia total de la parte del circuito que está en paralelo, $R_{T(p)}$, es de 3.11 kΩ.

$$I_{AC} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_1 + R_D}\right)I_T = \left(\frac{3.11\text{ k}\Omega}{1.73\text{ k}\Omega + 4.7\text{ k}\Omega}\right)3.56\text{ mA} = 1.72\text{ mA}$$

$$I_{AD} = \left(\frac{R_{T(p)}}{R_2 + R_E}\right)I_T = \left(\frac{3.11\text{ k}\Omega}{2.12\text{ k}\Omega + 3.9\text{ k}\Omega}\right)3.56\text{ mA} = 1.84\text{ mA}$$

El voltaje desde la terminal C hasta la terminal D es

$$V_{CD} = I_{AD}R_E - I_{AC}R_D = (1.84\text{ mA})(3.9\text{ k}\Omega) - (1.72\text{ mA})(4.7\text{ k}\Omega)$$
$$= 7.18\text{ V} - 8.08\text{ V} = \mathbf{-0.9\text{ V}}$$

V_{CD} es el voltaje presente entre los extremos de la carga (R_C) en el circuito puente mostrado en la figura 8-64. La corriente de carga a través de R_C es

$$I_{R_C} = \frac{V_{CD}}{R_C} = \frac{-0.9\text{ V}}{18\text{ k}\Omega} = \mathbf{-50\ \mu A}$$

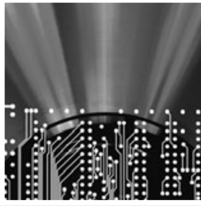
Problema relacionado Determine la corriente de carga, I_{RC}, en la figura 8-64 para los siguientes valores de resistor R_A = 27 kΩ, R_B = 33 kΩ, R_D = 39 kΩ, R_E = 47 kΩ, y R_C = 100 kΩ.



Use el archivo Multisim E08-20 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 8-8

1. Trace un circuito delta.
2. Trace un circuito Y.
3. Escriba las fórmulas empleadas para efectuar la conversión delta a Y.
4. Escriba las fórmulas empleadas para efectuar la conversión Y a delta.



Una aplicación de circuito

El puente Wheatstone se introdujo en el capítulo 7 y se amplió en este capítulo para incluir el uso del teorema de Thevenin. En el capítulo 7, la aplicación de circuito utilizó un termistor en un brazo del puente para detectar temperatura. El puente se utilizó para comparar la resistencia del termistor con la resistencia de un reóstato, el cual fija la temperatura a la que la salida cambiaría desde una polaridad a la opuesta para encender un calentador en un tanque lleno de líquido. En esta aplicación de circuito se trabajará con un circuito similar, pero ahora se le utilizará para monitorear la temperatura presente en el tanque y obtener una indicación visual de que se encuentra dentro de un intervalo especificado.

El monitor de temperatura

El circuito de medición básico en el monitor de temperatura es un puente Wheatstone con un amperímetro y un resistor en serie que actúa como la carga. El medidor es un medidor analógico que tiene sensibilidad de 50 μA a escala completa. El circuito de medición de temperatura de puente Wheatstone se muestra en la figura 8-66(a), y el medidor aparece en la figura 8-66(b).

El termistor

El termistor es el mismo que se utilizó en la aplicación de circuito del capítulo 7, específicamente, un termistor Thermometrics RL2006-13.3K-140-D1 con resistencia especificada de 25 kΩ a 25^{o}C y una β de 4615K. Recuerde que *b* es una constante suministrada por el fabricante para indicar la forma de la característica de resistencia-temperatura. Como se dio con anterioridad, la ecuación exponencial para la resistencia de un termistor se representa de manera aproximada mediante

$$R_T = R_0 e^{\beta\left(\frac{T_0 - T}{T_0 T}\right)}$$

donde:

R_T = la resistencia a una temperatura dada

R_O = la resistencia a una temperatura de referencia

T_O = la temperatura de referencia en K (típicamente 298 K, la cual es de 25^{o}C)

T = temperatura (K)

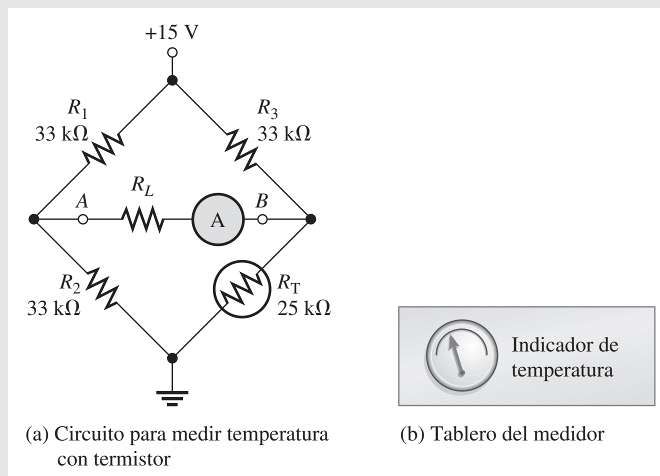
β = una constante (K) provista por el fabricante

Previamente se mostró una gráfica de esta ecuación en la figura 7-60. Usted puede confirmar que sus cálculos de la resistencia del termistor en esta aplicación de circuito están en concordancia razonable con esta gráfica.

Circuito de medición de temperatura

El puente Wheatstone está diseñado para que se equilibre a 20^{o}C. La resistencia del termistor es aproximadamente de 33 kΩ a esta temperatura. Puede confirmarse este valor sustituyendo la temperatura (en grados Kelvin) en la ecuación para R_T. Recuerde que la temperatura en K es de ^{o}C + 273.

- Sustituya en la ecuación para R_T, calcule la resistencia del termistor a una temperatura de 50^{o}C (deflexión de escala completa del medidor).
- Thevenize el puente entre las terminales *A* y *B* conservando la tierra de referencia y formando dos circuitos Thevenin, uno frente al otro, como se ilustró en la figura 8-42. Suponga que la temperatura del termistor es de 50^{o}C y que su resistencia es el valor calculado previamente. Trace el circuito Thevenin para esta temperatura pero no muestre una carga.
- Muestre el resistor de carga para el circuito Thevenin que trazó. La carga es un resistor en serie con el amperímetro, el cual tendrá una corriente de 50 μA a la deflexión de escala completa (50^{o}C). Usted puede determinar el valor del resistor de carga requerido aplicando el teorema de superposición a las dos



(a) Circuito para medir temperatura con termistor

(b) Tablero del medidor

▶ FIGURA 8–66

fuentes y calculando la resistencia total mediante la ley de Ohm (usando la deflexión de escala completa como la corriente). Reste la resistencia Thevenin de cada brazo a la resistencia total para obtener la resistencia de carga requerida. Omita la resistencia del medidor. Muestre el valor calculado en el circuito Thevenin.

- Calcule la resistencia del termistor para los límites inferior y superior (30°C y 40°C). Trace los circuitos Thevenin para cada temperatura y calcule la corriente que circula a través del resistor de carga.

La escala del medidor

Un requerimiento para el monitor de temperatura es marcar tres bandas de color en el medidor para indicar que la temperatura está dentro del intervalo deseado. Éste se encuentra entre los 30 y 40°C. El medidor deberá indicar un intervalo demasiado frío de 20 a 30°C, un intervalo de operación apropiada de 30 a 40°C, y un intervalo demasiado caliente de 40 y 50°C. La deflexión de escala completa del medidor deberá ser ajustada para 50°C.

- Indique cómo marcaría usted el medidor para tener una rápida indicación visual de la temperatura presente en el tanque.

Repaso

1. A 35°C, ¿cuál es la corriente que circula en el medidor?
2. ¿Qué cambio se requiere cuando se utiliza un medidor de 100 μA en lugar de uno de 50 μA?

RESUMEN

- Una fuente de voltaje ideal tiene resistencia interna de cero. Proporciona un voltaje constante entre las terminales sin importar la resistencia de carga.
- Una fuente de voltaje práctica tiene resistencia interna distinta de cero.
- Una fuente de corriente ideal tiene resistencia interna infinita. Proporciona una corriente constante sin importar la resistencia de la carga.
- Una fuente de corriente práctica tiene resistencia interna finita.
- El teorema de superposición es útil para circuitos de fuentes múltiples.
- El teorema de Thevenin permite reducir cualquier circuito resistivo lineal de dos terminales a una forma equivalente compuesta por una fuente de voltaje equivalente en serie con una resistencia equivalente.
- El término *equivalencia*, tal como se utiliza en los teoremas de Thevenin y de Norton, significa que al conectar una resistencia de carga dada al circuito equivalente, la resistencia tendrá el mismo voltaje y la misma corriente a través de ella como cuando estaba conectada al circuito original.
- El teorema de Norton permite reducir cualquier circuito resistivo lineal de dos terminales a una forma equivalente compuesta por una fuente de corriente equivalente en paralelo con una resistencia equivalente.
- Se transfiere potencia máxima a una carga desde una fuente cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia interna de la fuente.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave también se definen en el glosario incluido al final del libro.

Equivalencia terminal Es el concepto de que, cuando cualquier resistencia de carga dada se conecta a dos fuentes, éstas producen el mismo voltaje de carga y la misma corriente de carga.

Teorema de Norton Método empleado para transformar un circuito lineal de dos terminales en un circuito equivalente con sólo una fuente de corriente en paralelo con una resistencia.

Teorema de superposición Método útil para el análisis de circuitos que tienen más de una fuente.

Teorema de Thevenin Es un método empleado para transformar un circuito lineal de dos terminales en un circuito equivalente con sólo una fuente de voltaje en serie con una sola resistencia.

Transferencia de potencia máxima Para un voltaje de fuente dado, una transferencia de potencia máxima desde una fuente hasta una carga ocurre cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia interna de la fuente.

FÓRMULAS

Conversiones Δ a Y

8–1 $$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

8–2 $$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

8–3 $$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C}$$

Conversiones Y a Δ

8–4 $$R_A = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2}$$

8–5 $$R_B = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1}$$

8–6 $$R_C = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_3}$$

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Se conecta una carga de 100 Ω entre las terminales de una fuente de voltaje ideal con $V_S = 10$ V. El voltaje entre los extremos de la carga es de

(a) 0 V **(b)** 10 V **(c)** 100 V

2. Se conecta una carga de 100 Ω entre las terminales de una fuente de voltaje con $V_S = 10$ V y $R_S = 10$ Ω. El voltaje entre los extremos de la carga es de

(a) 10 V **(b)** 0 V **(c)** 9.09 V **(d)** 0.909 V

3. Cierta fuente de voltaje tiene los valores $V_S = 25$ V y $R_S = 5$ Ω. Los valores para una fuente de corriente equivalente son de

(a) 5 A, 5 Ω **(b)** 25 A, 5 Ω **(c)** 5 A, 125 Ω

4. Cierta fuente de corriente tiene los valores $I_S = 3$ μA y $R_S = 1.0$ MΩ. Los valores para una fuente de voltaje equivalente son de

(a) 3 μV, 1.0 MΩ **(b)** 3 V, 1.0 MΩ **(c)** 1 V, 3.0 MΩ

5. En un circuito de dos fuentes, una fuente que actúa sola produce 10 mA a través de una rama dada. La otra fuente que actúa sola produce 8 mA en la dirección opuesta a través de la misma rama. La corriente real a través de la rama es de

(a) 10 mA **(b)** 18 mA **(c)** 8 mA **(d)** 2 mA

6. El teorema de Thevenin convierte un circuito en una forma equivalente compuesta de

(a) una fuente de corriente y una resistencia en serie

(b) una fuente de voltaje y una resistencia en paralelo

(c) una fuente de voltaje y una resistencia en serie

(d) una fuente de corriente y una resistencia en paralelo

7. El voltaje equivalente de Thevenin en un circuito dado se determina

(a) poniendo en cortocircuito las terminales de salida

(b) abriendo las terminales de salida

(c) poniendo en cortocircuito la fuente de voltaje

(d) eliminando la fuente de voltaje y reemplazándola con un cortocircuito

8. Cierto circuito produce 15 V entre sus terminales de salida abiertas, y cuando se conecta una carga de 10 kΩ entre sus terminales de salida, produce 12 V. El equivalente de Thevenin para este circuito es de

(a) 15 V en serie con 10 kΩ **(b)** 12 V en serie con 10 kΩ

(c) 12 V en serie con 2.5 kΩ **(d)** 15 V en serie con 2.5 kΩ

9. Una fuente transfiere potencia máxima a una carga cuando
   (a) la resistencia de la carga es muy grande
   (b) la resistencia de la carga es muy pequeña
   (c) la resistencia de la carga es dos veces la resistencia de la fuente
   (d) la resistencia de la carga es igual a la resistencia de la fuente
10. Para el circuito descrito en la pregunta 8, se transfiere potencia máxima a una
   (a) carga de 10 kΩ **(b)** carga de 2.5 kΩ **(c)** carga de resistencia infinitamente grande

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 8-69.

1. Si se desarrolla un cortocircuito entre los extremos de R_4, el voltaje entre los extremos de R_5
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
2. Si la fuente de 2 V se abre, el voltaje entre los extremos de R_1
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
3. Si R_2 se abre, la corriente a través de R_1
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 8-77.

4. Si R_L se abre, el voltaje en la terminal de salida con respecto a tierra
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
5. Si cualquiera de los resistores de 5.6 kΩ se pone en cortocircuito, la corriente a través del resistor de carga
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
6. Si cualquiera de los resistores de 5.6 kΩ se pone en cortocircuito, la corriente producida por la fuente
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 8-79.

7. Si la entrada al amplificador se pone en cortocircuito con tierra, la corriente extraída de ambas fuentes de voltaje
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 8-82.

8. Si R_1 es en realidad de 1.0 kΩ en lugar de 10 kΩ, el voltaje esperado entre *A* y *B*
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia
9. Si se conecta un resistor de carga de 10 MΩ desde *A* hasta *B*, el voltaje entre *A* y *B*
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
10. Si se desarrolla un cortocircuito entre los extremos de R_4, la magnitud del voltaje entre *A* y *B*
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 8-84.

11. Si el resistor de 220 Ω se abre, V_{AB}
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
12. Si se desarrolla un cortocircuito entre los extremos de un resistor de 330 Ω, V_{AB}
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 8-85(d).

13. Si el resistor de 680 Ω se abre, la corriente a través de R_L
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
14. Si el resistor de 47 Ω se pone en cortocircuito, el voltaje entre los extremos de R_L
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

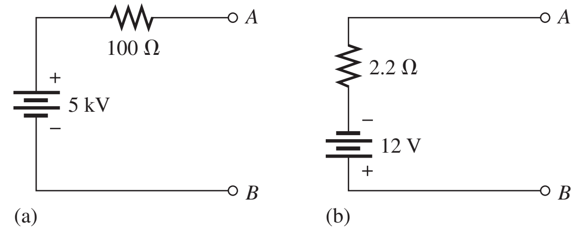
Un asterisco (*) señala los problemas más difíciles.
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 8–3 Conversiones de fuente

1. Una fuente de voltaje tiene los valores $V_S = 300$ V y $R_S = 50\ \Omega$. Conviértala en una fuente de corriente equivalente.

2. Convierta las fuentes de voltaje prácticas de la figura 8-67 en fuentes de corriente equivalentes.

▶ FIGURA 8–67



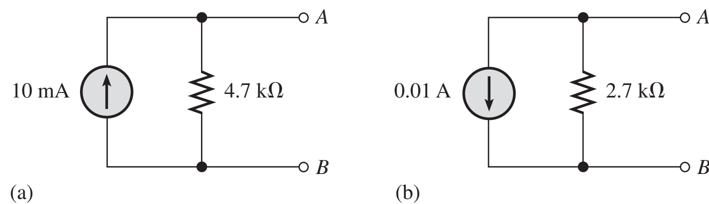
3. Una batería tipo D nueva tiene entre sus terminales un voltaje de 1.6 V y puede suministrar hasta 8.0 A a un cortocircuito durante muy poco tiempo. ¿Cuál es la resistencia interna de la batería?

4. Trace los circuitos equivalentes de fuentes de voltaje y corriente para la batería tipo D del problema 3.

5. Una fuente de corriente tiene una I_S de 600 mA y una R_S de 1.2 kΩ. Conviértala en una fuente de voltaje equivalente.

6. Convierta las fuentes de corriente prácticas de la figura 8-68 en fuentes de voltaje equivalentes.

▶ FIGURA 8–68

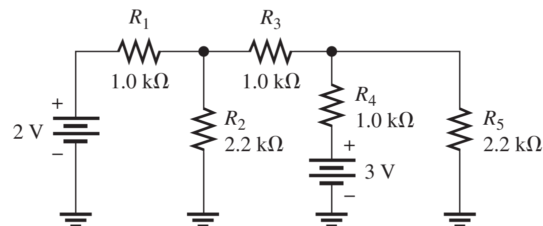


SECCIÓN 8–4 El teorema de superposición

7. Con el método de superposición, encuentre la corriente a través de R_5 en la figura 8-69.

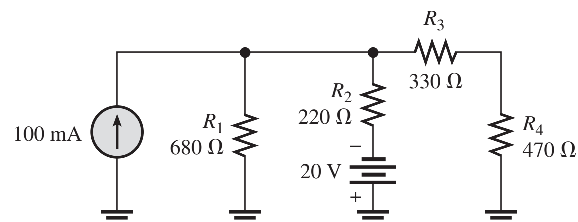
8. Use el teorema de superposición para determinar la corriente a través, y el voltaje entre, los extremos de la rama R_2 de la figura 8-69.

▶ FIGURA 8–69

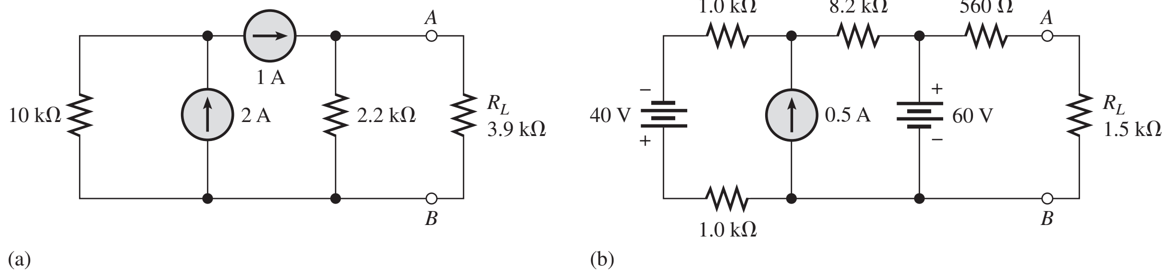


9. Con el teorema de superposición, determine la corriente a través de R_3 en la figura 8-70.

▶ FIGURA 8–70



10. Con el teorema de superposición, determine la corriente de carga en cada uno de los circuitos mostrados en la figura 8-71.

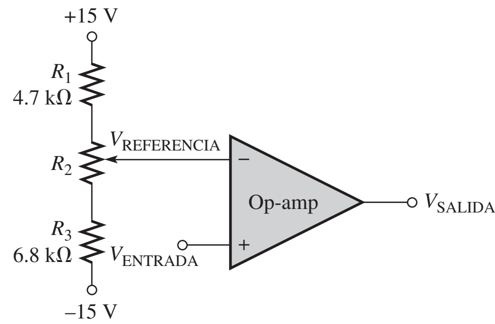


▲ **FIGURA 8–71**

11. En la figura 8-72 se muestra un circuito comparador. El voltaje de entrada, $V_{ENTRADA}$, se compara con el voltaje de referencia, $V_{REFERENCIA}$, y se genera una salida negativa si $V_{REFERENCIA} > V_{ENTRADA}$; de lo contrario es positiva. El comparador no carga a una u otra entrada. Si R_2 es de 1.0 kΩ, ¿cuál es el intervalo del voltaje de referencia?

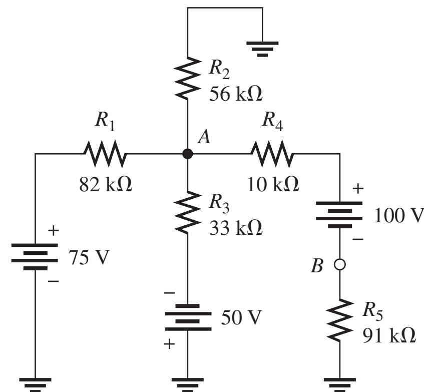
12. Repita el problema 11 si R_2 es de 10 kΩ.

▶ **FIGURA 8–72**



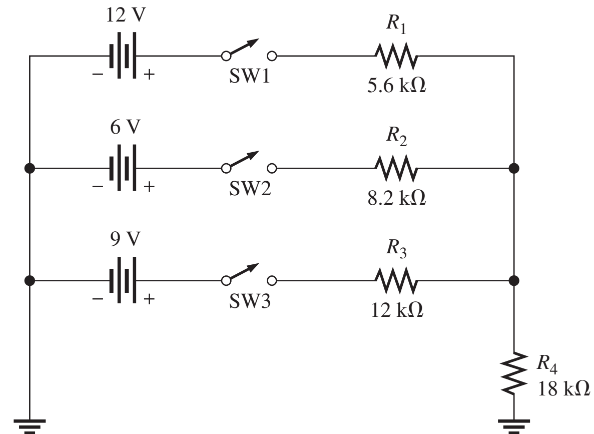
* **13.** Determine el voltaje del punto *A* al punto *B* en la figura 8-73.

▶ **FIGURA 8–73**

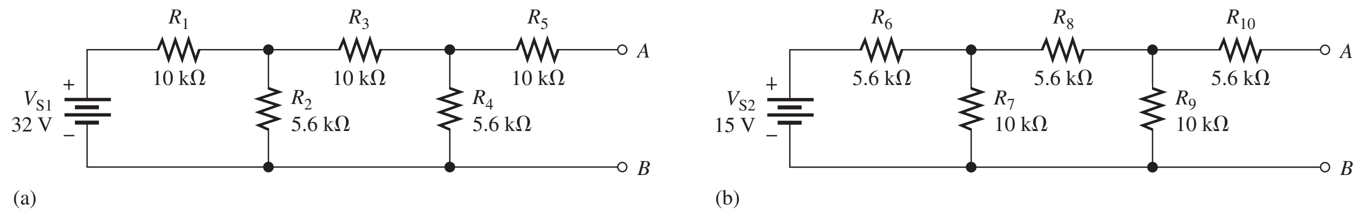


14. Los interruptores mostrados en la figura 8-74 se cierran en secuencia, SW1 primero. Determine la corriente a través de R_4 después del cierre de cada interruptor.

▶ FIGURA 8–74



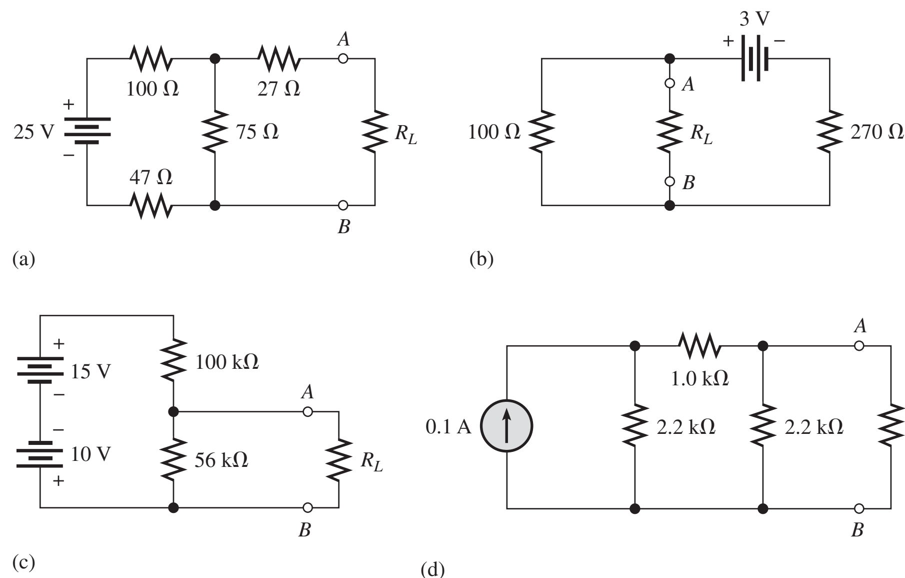
* **15.** La figura 8-75 muestra dos redes en escalera. Determine la corriente producida por cada una de las baterías cuando se conectan las terminales *A* (*A* a *A*) y las terminales *B* (*B* a *B*).



▲ FIGURA 8–75

SECCIÓN 8–5 Teorema de Thevenin

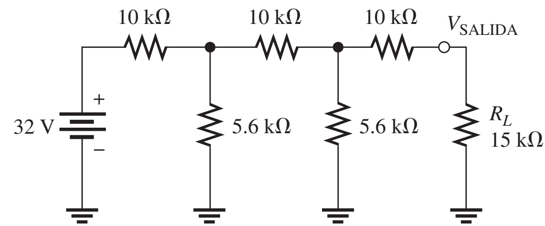
16. Para cada uno de los circuitos de la figura 8-76, determine el equivalente de Thevenin como se ve desde las terminales *A* y *B*.



▲ FIGURA 8–76

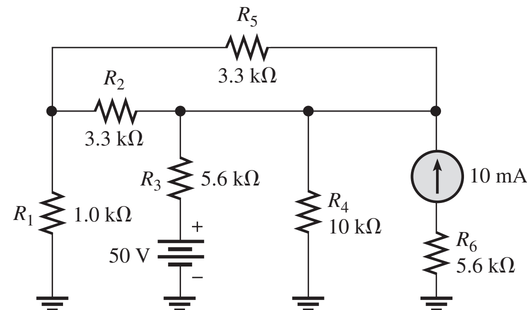
17. Con el teorema de Thevenin, determine la corriente a través de la carga R_L en la figura 8-77.

▶ **FIGURA 8–77**



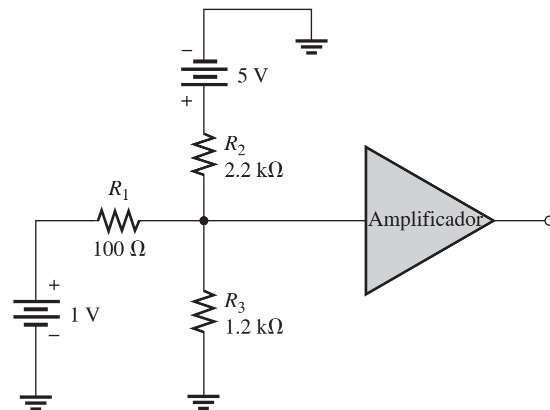
*__18.__ Con el teorema de Thevenin, determine el voltaje entre los extremos de R_4 en la figura 8-78.

▶ **FIGURA 8–78**

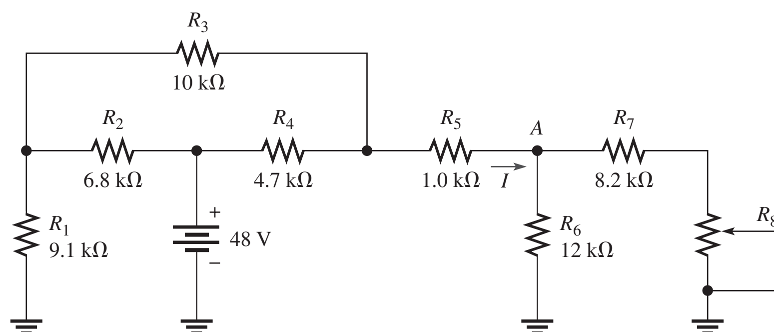


19. Determine el equivalente de Thevenin para el circuito externo al amplificador de la figura 8-79.

▶ **FIGURA 8–79**

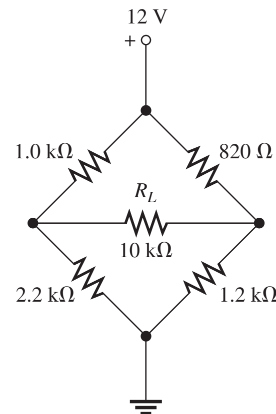


20. Determine la corriente que se dirige al punto A cuando R_8 es de 1.0 kΩ, 5 kΩ, y 10 kΩ en la figura 8-80.



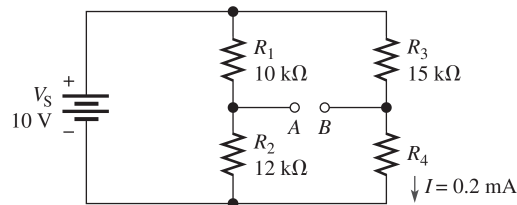
▲ **FIGURA 8–80**

*21. Determine la corriente a través del resistor de carga en el circuito puente de la figura 8-81.



▲ FIGURA 8–81

22. Determine el equivalente de Thevenin del circuito mostrado en la figura 8-82 visto desde las terminales *A* y *B*.



▲ FIGURA 8–82

SECCIÓN 8–6 Teorema de Norton

23. Para cada uno de los circuitos mostrados en la figura 8-76, determine el equivalente Norton visto por R_L.

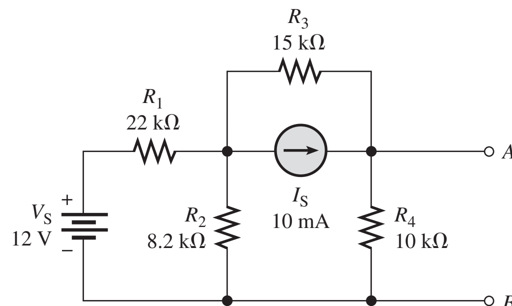
24. Con el teorema de Norton, determine la corriente que circula a través del resistor de carga R_L en la figura 8-77.

* 25. Con el teorema de Norton, determine el voltaje entre los extremos de R_5 en la figura 8-78.

26. Con el teorema de Norton, determine la corriente que circula a través de R_1 en la figura 8-80 cuando $R_8 = 8$ kΩ.

27. Determine el circuito equivalente Norton para el puente que aparece en la figura 8-81 sin R_L.

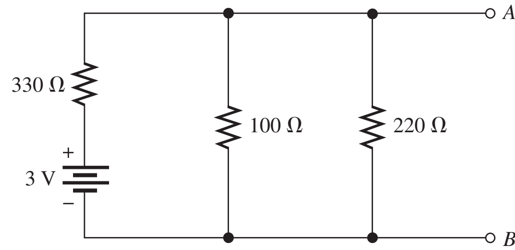
28. En la figura 8-83, reduzca el circuito entre las terminales *A* y *B* a su equivalente Norton.



▲ FIGURA 8–83

29. Aplique el teorema de Norton al circuito de la figura 8-84.

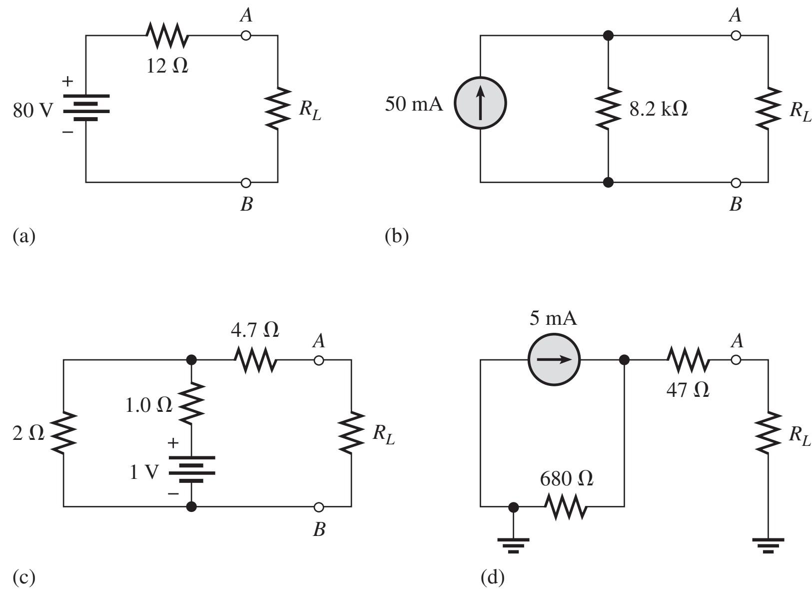
▶ **FIGURA 8–84**



SECCIÓN 8–7 Teorema de transferencia de potencia máxima

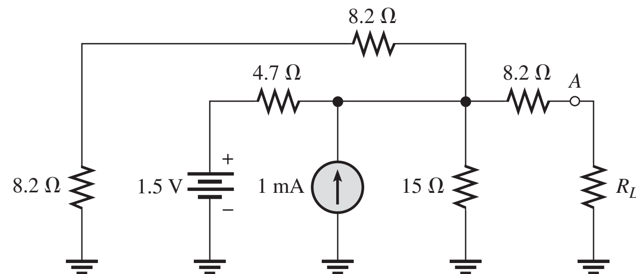
30. En cada circuito mostrado en la figura 8-85, se tiene que transferir potencia máxima a la carga R_L. Determine el valor apropiado de R_L en cada caso.

▶ **FIGURA 8–85**



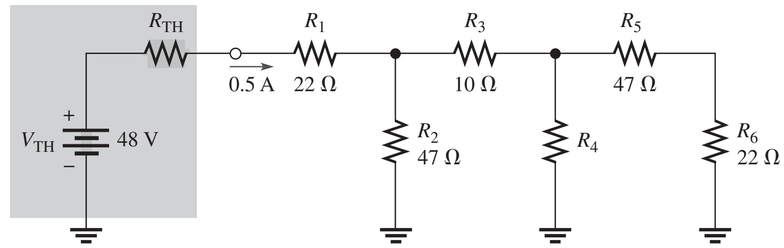
31. En el circuito de la figura 8-86, determine el valor de R_L para transferencia de potencia máxima.

▶ **FIGURA 8–86**



32. ¿Cuánta potencia se suministra a la carga cuando R_L es un 10% más alta que su valor para transferencia de potencia máxima en el circuito de la figura 8-86?

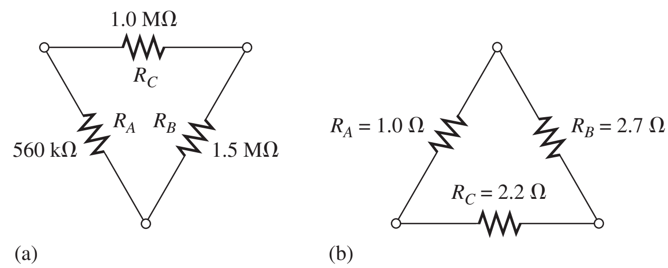
33. ¿Cuáles son los valores de R_4 y R_{TH} cuando la potencia máxima se transfiere de la fuente thevenizada a la red en configuración de escalera de la figura 8-87?



▲ FIGURA 8–87

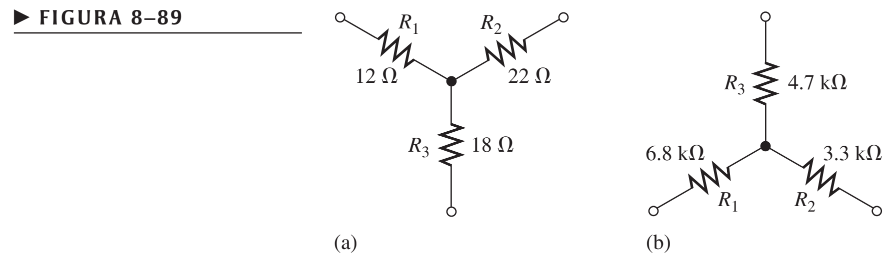
SECCIÓN 8–8 Conversiones delta a Y (Δ a Y) y Y a Δ

34. En la figura 8-88, convierta cada red delta en una red Y.



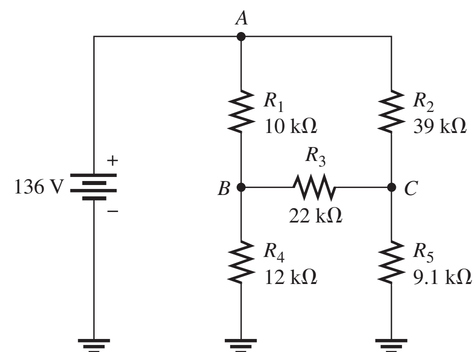
▲ FIGURA 8–88

35. En la figura 8-89, convierta cada red Y en una red delta.



▶ FIGURA 8–89

* **36.** Determine todas las corrientes que circulan en el circuito de la figura 8-90.



▶ FIGURA 8–90



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

37. Abra el archivo P08-37 y compruebe que la corriente a través de cada resistor es correcta y, si no, determine la falla.

38. Abra el archivo P08-38 y, utilizando mediciones, determine el equivalente de Thevenin del circuito entre la terminal *A* y tierra.

39. Abra el archivo P08-39 y, utilizando mediciones, determine el equivalente Norton del circuito entre la terminal *A* y tierra.

40. Abra el archivo P08-40 y determine la falla, si la hay.

41. Abra el archivo P08-41 y determine el valor de un resistor de carga que ha de ser conectado entre las terminales *A* y *B* para lograr la transferencia de potencia máxima.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

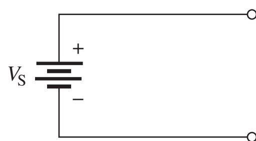
SECCIÓN 8–1 La fuente de voltaje de cd

1. Para una fuente de voltaje ideal, vea la figura 8-91.

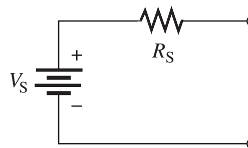
2. Para una fuente de voltaje práctica, vea la figura 8-92.

3. La resistencia interna de una fuente de voltaje ideal es de cero ohms.

4. El voltaje de salida de una fuente de voltaje varía directamente con la resistencia de la carga.



▲ FIGURA 8–91



▲ FIGURA 8–92

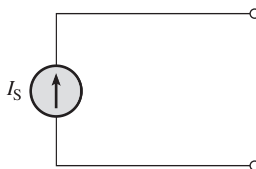
SECCIÓN 8–2 La fuente de corriente

1. Para una fuente de corriente ideal, vea la figura 8-93.

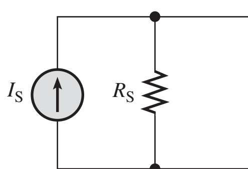
2. Para una fuente de corriente práctica, vea la figura 8-94.

3. Una fuente de corriente ideal tiene una resistencia interna infinita.

4. La corriente de carga producida por una fuente de corriente varía inversamente con la resistencia de la carga.



▲ FIGURA 8–93



▲ FIGURA 8–94

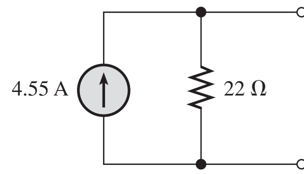
SECCIÓN 8–3 Conversiones de fuente

1. $I_S = V_S/R_S$

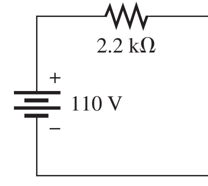
2. $V_S = I_SR_S$

3. Vea la figura 8-95.

4. Vea la figura 8-96.



▲ FIGURA 8–95



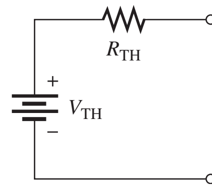
▲ FIGURA 8–96

SECCIÓN 8–4 El teorema de superposición

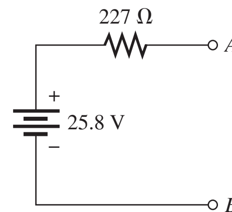
1. El teorema de superposición establece que la corriente total en cualquier rama de un circuito lineal con fuentes múltiples es igual a la suma algebraica de las corrientes producidas por las fuentes individuales que actúan solas, con las demás fuentes reemplazadas por sus resistencias internas.
2. El teorema de superposición permite tratar a cada fuente de manera independiente.
3. Un cortocircuito simula la resistencia interna de una fuente de voltaje ideal; una abertura simula la resistencia interna de una fuente de corriente ideal.
4. $I_{R1} = 6.67$ mA
5. La corriente neta ocurre en dirección de la corriente más grande.

SECCIÓN 8–5 Teorema de Thevenin

1. Un circuito equivalente de Thevenin consta de V_{TH} y R_{TH}.
2. Vea la figura 8-97 en cuanto a la forma general de un circuito equivalente de Thevenin.
3. En un circuito, V_{TH} es el voltaje de circuito abierto entre dos terminales.
4. En un circuito, R_{TH} es la resistencia vista desde dos terminales con todas las demás fuentes reemplazadas por sus resistencias internas.
5. Vea la figura 8-98.



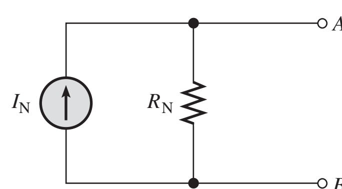
▲ FIGURA 8–97



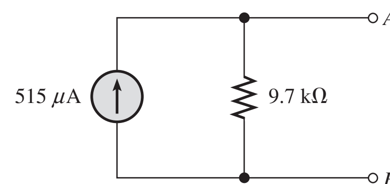
▲ FIGURA 8–98

SECCIÓN 8–6 Teorema de Norton

1. Un circuito equivalente Norton consta de I_N y R_N.
2. Vea la figura 8-99 en cuanto a la forma general de un circuito equivalente Norton.
3. I_N es la corriente de cortocircuito que circula entre las dos terminales de un circuito.
4. En un circuito, R_N es la resistencia vista desde las dos terminales abiertas.
5. Vea la figura 8-100.



▲ FIGURA 8–99



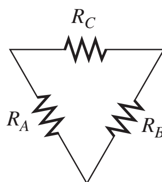
▲ FIGURA 8–100

SECCIÓN 8–7 Teorema de transferencia de potencia máxima

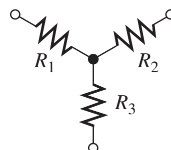
1. Para una fuente de voltaje dada, el teorema de transferencia de potencia máxima establece que la potencia máxima se transfiere de una fuente a una carga cuando la resistencia de ésta es igual a la resistencia interna de aquella.
2. Se suministra potencia máxima a una carga cuando $R_L = R_S$.
3. $R_L = R_S = 50\ \Omega$

SECCIÓN 8–8 Conversiones delta a Y (Δ a Y) y Y a delta (Y a Δ)

1. Para un circuito delta, vea la figura 8-101.
2. Para un circuito Y, vea la figura 8-102.



▲ FIGURA 8–101



▲ FIGURA 8–102

3. Las ecuaciones para conversión delta a Y son

$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

$$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C}$$

4. Las ecuaciones para conversión Y a delta son

$$R_A = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_2}$$

$$R_B = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_1}$$

$$R_C = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_3}$$

Una aplicación de circuito

1. 27.8 μA
2. La resistencia total en serie a 50ºC tiene que ser de 47.1 kΩ (brazos del puente, termistor y resistor limitante). El resistor en serie tiene que ser reducido a 26.2 kΩ. (47.1 kΩ − (16.5 kΩ + 4.38 kΩ)

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

8–1 99.5 V

8–2 100 V

8–3 3.33 kΩ

8–4 1.2 A; 10 Ω

8–5 300 V; 600 Ω

8–6 16.6 mA

8–7 I_S no se ve afectada.

8–8 7 mA
8–9 5 mA
8–10 2.36 V; 1240 Ω
8–11 1.17 mA
8–12 0.7 V; V_{SALIDA} es 17.7 más grande que $V_{ENTRADA}$ en la base (B).
8–13 25.4 mA
8–14 131 Ω
8–15 $R_N = 248\ \Omega$
8–16 6.93 V
8–17 41.7 mW
8–18 $R_1 = 792\ \Omega$, $R_2 = 360\ \Omega$, $R_3 = 440\ \Omega$
8–19 $R_A = 712\ \Omega$, $R_B = 2.35\ \text{k}\Omega$, $R_C = 500\ \Omega$
8–20 0.3 μA

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (c) **3.** (a) **4.** (b) **5.** (d) **6.** (c) **7.** (b) **8.** (d)
9. (d) **10.** (b)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (a) **2.** (b) **3.** (b) **4.** (a) **5.** (b) **6.** (a) **7.** (a) **8.** (a)
9. (b) **10.** (a) **11.** (a) **12.** (a) **13.** (a) **14.** (a)

9 Análisis de ramas, lazos y nodos

Esquema del capítulo

Objetivos del capítulo

- Analizar tres métodos de resolver ecuaciones simultáneas
- Utilizar el método de la corriente en ramas para determinar cantidades desconocidas en un circuito
- Utilizar el análisis de lazos para determinar cantidades desconocidas en un circuito
- Utilizar el análisis de nodos para determinar cantidades desconocidas en un circuito

Términos clave

- Determinante
- Ecuaciones simultáneas
- Lazos
- Matriz
- Nodo
- Rama

Descripción previa de una aplicación de circuito

En la aplicación, se analizará el modelo de un amplificador utilizando el método estudiado en este capítulo.

Visite el sitio web relacionado

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://www.pearsoneducacion.net/floyd

Introducción

En el capítulo 8, aprendió sobre el teorema de superposición, el teorema de Thevenin, el teorema de Norton, el teorema de transferencia de potencia máxima, y acerca de diversos tipos de métodos de conversión. Estos teoremas y métodos de conversión son útiles al resolver algunos tipos de problemas de circuitos tanto de cd como de ca.

En este capítulo se introducen otros tres métodos de análisis de circuitos. Estos métodos, basados en la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff, son particularmente útiles en el análisis de circuitos de múltiples lazos que tienen dos o más fuentes de voltaje o de corriente. Los métodos que aquí se presentan pueden ser utilizados solos o junto con las técnicas abordadas en capítulos previos. Con experiencia, usted aprenderá cuál método es el mejor para un problema en particular, o puede ser que llegue a preferir uno de ellos.

En el método de la corriente en ramas, se aplicarán las leyes de Kirchhoff para determinar la corriente en varias ramas de un circuito de múltiples lazos. Un lazo es una trayectoria completa para la corriente que circula en un circuito. En el método de la corriente en lazos, se determinarán las corrientes de lazo, y no las corrientes de rama. En el método del voltaje en nodos, se determinarán los voltajes presentes en los nodos independientes de un circuito. Como se sabe, un nodo es la unión de dos o más componentes.

9–1 ECUACIONES SIMULTÁNEAS EN EL ANÁLISIS DE CIRCUITOS

Los métodos de análisis de circuitos que se abordan en este capítulo permiten determinar dos o más corrientes o voltajes desconocidos por medio de ecuaciones simultáneas. Estos métodos de análisis, los cuales incluyen corriente en ramas, corriente en lazos, y métodos del voltaje en nodos, producen tanto ecuaciones como incógnitas. La cobertura se limita a ecuaciones con dos incógnitas (2o. grado) y ecuaciones con tres incógnitas (3er. grado). Estas ecuaciones pueden ser resueltas entonces simultáneamente para las incógnitas por medio de uno de los métodos abordados en esta sección.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar tres métodos de resolver ecuaciones simultáneas**
  - Escribir un conjunto de ecuaciones simultáneas en la forma estándar
  - Resolver ecuaciones simultáneas mediante sustitución algebraica
  - Resolver ecuaciones simultáneas usando determinantes
  - Resolver ecuaciones simultáneas con una calculadora

Las **ecuaciones simultáneas** se componen de un conjunto de *n* ecuaciones que contiene *n* incógnitas, donde *n* es un número con un valor de 2 o más. El número de ecuaciones incluidas en el conjunto debe ser igual al número de incógnitas. Por ejemplo, para determinar dos variables desconocidas, se requieren dos ecuaciones; para tres incógnitas se requieren tres ecuaciones, y así sucesivamente.

Ecuaciones de segundo grado en la forma estándar

Una ecuación con dos variables se llama *ecuación de segundo grado*. En análisis de circuitos, las variables representan incógnitas tales como corriente o voltaje. Para determinar las variables x_1 y x_2, debe haber un conjunto de dos ecuaciones que contengan esas variables expresadas en la forma estándar.

En la forma estándar, las variables x_1 ocupan la primera posición en cada ecuación, y las variables x_2 ocupan la segunda posición en cada ecuación. Las variables con sus coeficientes están en el lado izquierdo de la ecuación, y las constantes en el lado derecho.

El conjunto de dos ecuaciones simultáneas de segundo grado escritas en la forma estándar es

$$\mathrm{a}_{1,1}x_1 + \mathrm{a}_{1,2}x_2 = \mathrm{b}_1$$
$$\mathrm{a}_{2,1}x_1 + \mathrm{a}_{2,2}x_2 = \mathrm{b}_2$$

En estas ecuaciones simultáneas, la “a” es el coeficiente de las variables x_1 y x_2 y puede representar valores de componentes de circuito. Advierta que los subíndices de los coeficientes contienen dos números. Por ejemplo, $\mathrm{a}_{1,1}$ aparece en la *primera* ecuación como el coeficiente de x_1, y $\mathrm{a}_{2,1}$ aparece en la *segunda* ecuación como el coeficiente de x_1. La “b” es la constante y puede representar una fuente de voltaje. Esta notación será usada cuando se utilice una calculadora para resolver las ecuaciones.

EJEMPLO 9–1

Asuma que las siguientes dos ecuaciones describen un circuito en particular con dos corrientes desconocidas, I_1 e I_2. Los coeficientes son valores de resistencia y las constantes son voltajes presentes en el circuito. Escriba las ecuaciones en la forma estándar.

$$2I_1 = 8 - 5I_2$$
$$4I_2 - 5I_1 + 6 = 0$$

Solución Reordene las ecuaciones en la forma estándar como sigue:

$$2I_1 + 5I_2 = 8$$
$$5I_1 + 4I_2 = -6$$

*Problema relacionado** Cambie estas dos ecuaciones a la forma estándar:

$$20x_1 + 15 = 11x_2$$
$$10 = 25x_2 + 18x_1$$

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Una ecuación de tercer grado contiene tres variables y un término constante. Al igual que en las ecuaciones de segundo grado, cada variable tiene un coeficiente. Para determinar las variables x_1, x_2, y x_3, debe haber un conjunto de tres ecuaciones simultáneas que las contenga. La forma general para tres ecuaciones simultáneas de tercer grado escrita en la forma estándar es

$$a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + a_{1,3}x_3 = b_1$$
$$a_{2,1}x_1 + a_{2,2}x_2 + a_{2,3}x_3 = b_2$$
$$a_{3,1}x_1 + a_{3,2}x_2 + a_{3,3}x_3 = b_3$$

EJEMPLO 9–2 Suponga que las tres ecuaciones siguientes describen un circuito particular con tres corrientes desconocidas I_1, I_2 e I_3. Los coeficientes son valores de resistencia y las constantes son voltajes conocidos en el circuito. Escriba las ecuaciones en la forma estándar.

$$4I_3 + 2I_2 + 7I_1 = 0$$
$$5I_1 + 6I_2 + 9I_3 - 7 = 0$$
$$8 = 1I_1 + 2I_2 + 5I_3$$

Solución Las ecuaciones se reacomodan para ponerlas en la forma estándar como sigue:

$$7I_1 + 2I_2 + 4I_3 = 0$$
$$5I_1 + 6I_2 + 9I_3 = 7$$
$$1I_1 + 2I_2 + 5I_3 = 8$$

Problema relacionado Cambie estas tres ecuaciones a la forma estándar:

$$10V_1 + 15 = 21V_2 + 50V_3$$
$$10 + 12V_3 = 25V_2 + 18V_1$$
$$12V_3 - 25V_2 + 18V_1 = 9$$

Soluciones de ecuaciones simultáneas

Tres formas de resolver ecuaciones simultáneas son la sustitución algebraica, el método de determinantes, y con una calculadora.

Solución por sustitución Se pueden resolver dos o tres ecuaciones simultáneas en la forma estándar mediante sustitución algebraica determinando primero una de las variables en función de las

otras. Sin embargo, como el proceso puede llegar a ser bastante tedioso, este método se restringirá a ecuaciones de segundo grado. Consideremos el siguiente conjunto de ecuaciones simultáneas:

$$2x_1 + 6x_2 = 8 \quad \text{(Ec. 1)}$$
$$3x_1 + 6x_2 = 2 \quad \text{(Ec. 2)}$$

Paso 1. Resuelva para x_1 en función de x_2 en la ecuación 1.

$$2x_1 = 8 - 6x_2$$
$$x_1 = 4 - 3x_2$$

Paso 2. Sustituya el resultado para x_1 en la ecuación 2 y resuelva para x_2.

$$3x_1 + 6x_2 = 2$$
$$3(4 - 3x_2) + 6x_2 = 2$$
$$12 - 9x_2 + 6x_2 = 2$$
$$-3x_2 = -10$$
$$x_2 = \frac{-10}{-3} = 3.33$$

Paso 3. Sustituya el valor para x_2 en la ecuación para x_1 en el paso 1.

$$x_1 = 4 - 3x_2 = 4 - 3(3.33) = 4 - 9.99 = -5.99$$

Solución por determinantes El método de determinantes es una parte del álgebra de matrices y proporciona un método de “recetario de cocina” para resolver ecuaciones simultáneas con dos o tres variables. Una **matriz** es una tabla de números, y un **determinante** es efectivamente la solución de una matriz, y cuyo resultado es un valor específico. Se utilizan determinantes de segundo grado para dos variables y de tercer grado para tres variables. Las ecuaciones deben estar en la forma estándar para encontrar su solución.

Con el propósito de ilustrar el método de determinantes para ecuaciones de segundo grado, se calculan los valores de I_1 e I_2 en las dos ecuaciones siguientes expresadas en la forma estándar:

$$10I_1 + 5I_2 = 15$$
$$2I_1 + 4I_2 = 8$$

En primer lugar, se forma el determinante característico a partir de la matriz de los coeficientes de las corrientes desconocidas. La primera columna del determinante se compone de los coeficientes de I_1, y la segunda de los coeficientes de I_2. El determinante que resulta es

1a. columna → ← 2a. columna

$$\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}$$

La evaluación de este determinante característico requiere tres pasos.

Paso 1. Se multiplica el primer número de la columna izquierda por el segundo número de la columna derecha.

$$\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix} = 10 \times 4 = 40$$

Paso 2. Se multiplica el segundo número de la columna izquierda por el primer número de la columna derecha.

$$\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix} = 2 \times 5 = 10$$

Paso 3. Se resta el producto obtenido en el paso 2 del producto obtenido en el paso 1.

$$40 - 10 = 30$$

Esta diferencia es el valor del determinante característico (30 en este caso).

A continuación, se reemplazan los coeficientes de I_1 de la primera columna del determinante característico con las constantes (números fijos) del lado derecho de las ecuaciones para formar otro determinante.

$$\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix}$$

Se reemplazan los coeficientes de I_1 con constantes de los lados derechos de las ecuaciones.

Este determinante I_1 se evalúa como sigue:

$$\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} = 15 \times 4 = 60$$

$$\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} = 60 - (8 \times 5) = 60 - 40 = 20$$

El valor de este determinante es 20.

Ahora se resuelve para I_1 dividiendo el determinante I_1 entre el determinante característico como sigue:

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 15 & 5 \\ 8 & 4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 10 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}} = \frac{20}{30} = 0.667 \text{ A}$$

Para determinar I_2, se forma otro determinante sustituyendo los coeficientes de I_2 en la segunda columna del determinante característico por las constantes del lado derecho de las ecuaciones dadas.

$$\begin{vmatrix} 10 & 15 \\ 2 & 8 \end{vmatrix}$$

Se reemplazan los coeficientes de I_2 con constantes de los lados derechos de las ecuaciones.

Se resuelve para I_2 dividiendo el determinante entre el determinante característico previamente encontrado.

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 10 & 15 \\ 2 & 8 \end{vmatrix}}{30} = \frac{(10 \times 8) - (2 \times 15)}{30} = \frac{80 - 30}{30} = \frac{50}{30} = 1.67 \text{ A}$$

EJEMPLO 9–3 Resuelva el siguiente conjunto de ecuaciones para determinar las corrientes desconocidas:

$$2I_1 - 5I_2 = 10$$
$$6I_1 + 10I_2 = 20$$

Solución Evalúe el determinante característico como sigue:

$$\begin{vmatrix} 2 & -5 \\ 6 & 10 \end{vmatrix} = (2)(10) - (-5)(6) = 20 - (-30) = 20 + 30 = 50$$

Al resolver para I_1 se obtiene

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 10 & -5 \\ 20 & 10 \end{vmatrix}}{50} = \frac{(10)(10) - (-5)(20)}{50} = \frac{100 - (-100)}{50} = \frac{200}{50} = \mathbf{4\ A}$$

Al resolver para I_2 se obtiene

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 10 \\ 6 & 20 \end{vmatrix}}{50} = \frac{(2)(20) - (6)(10)}{50} = \frac{40 - 60}{50} = \mathbf{-0.4\ A}$$

En un problema de circuito, un resultado con signo negativo indica que la dirección de la corriente se opone a la dirección asignada.

Observe que la multiplicación puede ser expresada o por el signo de multiplicación tal como 2×10 o por paréntesis, como en (2)(10).

Problema relacionado Resuelva el siguiente conjunto de ecuaciones para I_1:

$$5I_1 + 3I_2 = 4$$
$$I_1 + 2I_2 = -6$$

Los determinantes de tercer grado se evalúan por el método de expansión. Se ilustrará este método al determinar los valores de corriente desconocidos en las siguientes tres ecuaciones expresadas en la forma estándar:

$$1I_1 + 3I_2 - 2I_3 = 7$$
$$0I_1 + 4I_2 + 1I_3 = 8$$
$$-5I_1 + 1I_2 + 6I_3 = 9$$

El determinante característico para la matriz de coeficientes de este conjunto de ecuaciones se forma del mismo modo que el empleado para el determinante de segundo grado. La primera columna se compone de los coeficientes de I_1, la segunda de los coeficientes de I_2, y la tercera de los coeficientes de I_3, como se muestra a continuación

Coeficientes de I_1 — Coeficientes de I_2 — Coeficientes de I_3

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix}$$

Este determinante de tercer grado se evalúa aplicando el método de expansión como sigue:

Paso 1. Se escriben de nuevo las dos primeras columnas inmediatamente a la derecha del determinante.

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \\ -5 & 1 \end{matrix}$$

Paso 2. Se identifican los tres grupos diagonales dirigidos hacia abajo, de tres coeficientes cada uno.

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \\ -5 & 1 \end{matrix}$$

Paso 3. Se multiplican los números presentes en cada diagonal y se suman los productos.

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \\ -5 & 1 \end{matrix}$$

$$(1)(4)(6) + (3)(1)(-5) + (-2)(0)(1) = 24 + (-15) + 0 = 9$$

Paso 4. Se repiten los pasos 2 y 3 para los tres grupos diagonales dirigidos hacia arriba, de tres coeficientes cada uno.

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \\ -5 & 1 \end{matrix}$$

$$(-5)(4)(-2) + (1)(1)(1) + (6)(0)(3) = 40 + 1 + 0 = 41$$

Paso 5. Se resta el resultado del paso 4 al resultado del paso 3 para obtener el valor del determinante característico.

$$9 - 41 = -32$$

A continuación, se forma otro determinante sustituyendo los coeficientes de I_1 por las constantes del lado derecho de las ecuaciones en el determinante característico.

$$\begin{vmatrix} 7 & 3 & -2 \\ 8 & 4 & 1 \\ 9 & 1 & 6 \end{vmatrix}$$

Se evalúa este determinante con el método descrito en los pasos previos.

$$\begin{vmatrix} 7 & 3 & -2 \\ 8 & 4 & 1 \\ 9 & 1 & 6 \end{vmatrix} \begin{matrix} 7 & 3 \\ 8 & 4 \\ 9 & 1 \end{matrix}$$

$$= [(7)(4)(6) + (3)(1)(9) + (-2)(8)(1)] - [(9)(4)(-2) + (1)(1)(7) + (6)(8)(3)]$$
$$= (168 + 27 - 16) - (-72 + 7 + 144) = 179 - 79 = 100$$

Se resuelve para I_1 dividiendo este determinante entre el determinante característico. El resultado negativo indica que la corriente real circula en dirección opuesta a la suposición original.

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 7 & 3 & -2 \\ 8 & 4 & 1 \\ 9 & 1 & 6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 3 & -2 \\ 0 & 4 & 1 \\ -5 & 1 & 6 \end{vmatrix}} = \frac{100}{-32} = -3.125 \text{ A}$$

De igual modo se pueden encontrar I_2 e I_3.

EJEMPLO 9–4 Determine el valor de I_2 a partir del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$2I_1 + 0.5I_2 + 1I_3 = 0$$
$$0.75I_1 + 0I_2 + 2I_3 = 1.5$$
$$3I_1 + 0.2I_2 + 0I_3 = -1$$

Solución Evalúe el determinante característico como sigue:

$$\begin{vmatrix} 2 & 0.5 & 1 \\ 0.75 & 0 & 2 \\ 3 & 0.2 & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} 2 & 0.5 \\ 0.75 & 0 \\ 3 & 0.2 \end{matrix}$$

$$= [(2)(0)(0) + (0.5)(2)(3) + (1)(0.75)(0.2)] - [(3)(0)(1) + (0.2)(2)(2) + (0)(0.75)(0.5)]$$
$$= (0 + 3 + 0.15) - (0 + 0.8 + 0) = 3.15 - 0.8 = 2.35$$

Evalúe el determinante para I_2 como sigue:

$$\begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0.75 & 1.5 & 2 \\ 3 & -1 & 0 \end{vmatrix}\begin{matrix} 2 & 0 \\ 0.75 & 1.5 \\ 3 & -1 \end{matrix}$$

$$= [(2)(1.5)(0) + (0)(2)(3) + (1)(0.75)(-1)] - [(3)(1.5)(1) + (-1)(2)(2) + (0)(0.75)(0)]$$
$$= [0 + 0 + (-0.75)] - [4.5 + (-4) + 0] = -0.75 - 0.5 = -1.25$$

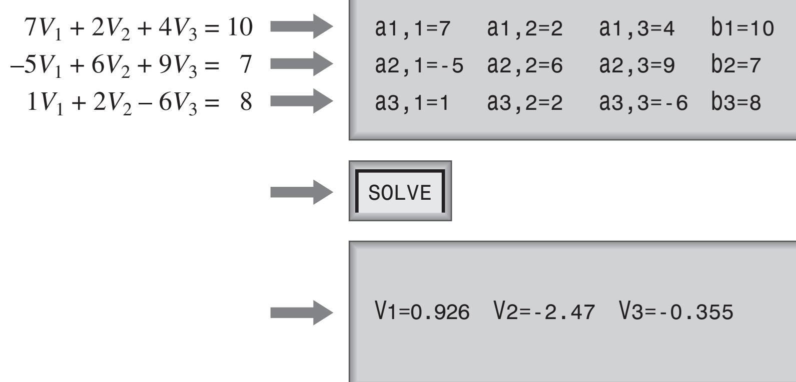
Por último, divida los dos determinantes,

$$I_2 = \frac{-1.25}{2.35} = -0.532\text{ A} = \mathbf{-532\text{ mA}}$$

Problema relacionado Determine el valor de I_1 en el conjunto de ecuaciones utilizadas en este ejemplo.

Solución mediante calculadora Las calculadoras en general emplean algoritmos matriciales para determinar la solución de ecuaciones simultáneas y facilitar la obtención de los resultados. Igual que con los dos métodos "manuales", es importante obtener primero las ecuaciones en la forma estándar antes de ingresar datos en la calculadora. Las calculadoras que ofrecen soluciones de ecuaciones simultáneas emplean generalmente la notación mencionada con anterioridad en relación con la forma general de ecuaciones. Las variables se designan como x_1, x_2, etc., los coeficientes como $a_{1,1}$, $a_{1,2}$, $a_{2,1}$, $a_{2,2}$, etc., y las constantes como b_1, b_2, etcétera.

Una secuencia típica para el ingreso de datos de un conjunto específico de ecuaciones en una calculadora se ilustra de modo genérico para tres ecuaciones simultáneas en la figura 9-1.



◀ FIGURA 9–1

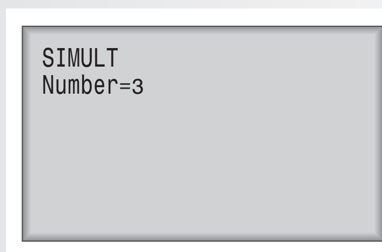
Se eligieron las calculadoras TI-86 y TI-89 para ilustrar el procedimiento en los dos ejemplos siguientes, aunque se pueden utilizar otras calculadoras científicas. Si su calculadora tiene capacidad para resolver ecuaciones simultáneas, consulte el manual del usuario para efectuar el procedimiento correcto.

EJEMPLO 9–5 Use la calculadora TI-86 para resolver las tres ecuaciones simultáneas siguientes y determinar las tres incógnitas.

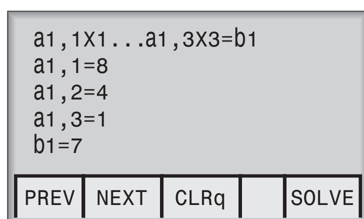
$$8I_1 + 4I_2 + 1I_3 = 7$$
$$2I_1 - 5I_2 + 6I_3 = 3$$
$$3I_1 + 3I_2 - 2I_3 = -5$$

Solución Oprima la segunda tecla, luego SIMULT para ingresar el número de ecuaciones como indica la figura 9-2.

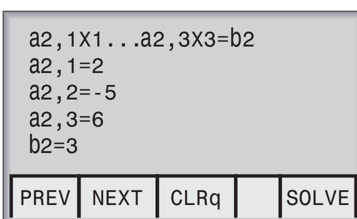
▶ **FIGURA 9–2**



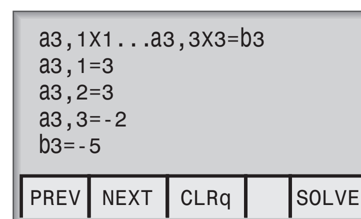
Después de ingresar 3 y oprimir ENTER, emerge la primera ecuación en pantalla. Ingrese los coeficientes 8, 4, 1 y la constante 7 oprimiendo cada tecla de número seguida por la tecla ENTER, lo cual hace que aparezca la pantalla mostrada en la figura 9-3(a). Luego de ingresar el último número y oprimir ENTER, aparece la segunda ecuación en pantalla. Ingrese los coeficientes 2, −5, 6 y la constante 3 como indica la figura 9-3(b). [Un valor negativo se ingresa oprimiendo primero la tecla (−)]. Por último, ingrese los coeficientes de la tercera ecuación (3, 3, −2) y la constante −5 según muestra la figura 9-3(c).



(a)



(b)

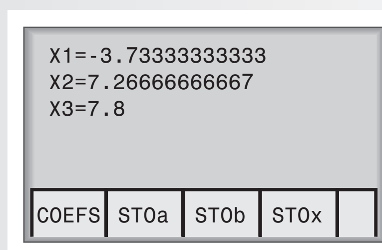


(c)

▲ **FIGURA 9–3**

Al seleccionar SOLVE, la tecla F5, se obtienen los resultados que muestra la figura 9-4. X1 es I_1, X2 es I_2, y X3 es I_3.

▶ **FIGURA 9–4**



Problema relacionado Modifique la ecuación para cambiar a1,2 de 4 a −3, a2,3 de 6 a 2.5, y b3 de −5 a 8 y resuelva las ecuaciones.

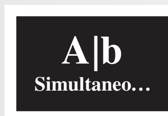
EJEMPLO 9–6 Use la calculadora TI-89 Titanium para resolver las mismas ecuaciones simultáneas del ejemplo 9-5.

$$8I_1 + 4I_2 + 1I_3 = 7$$

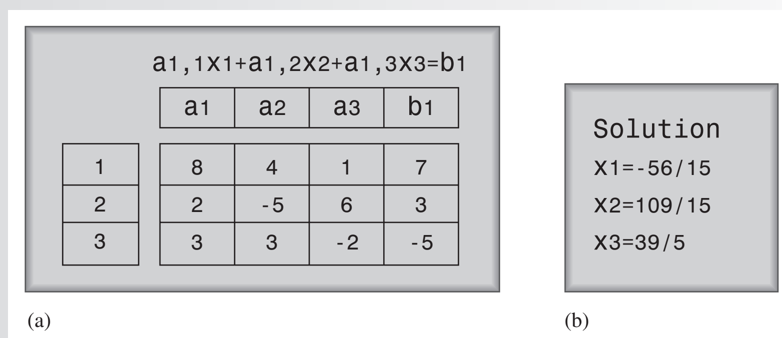
$$2I_1 - 5I_2 + 6I_3 = 3$$

$$3I_1 + 3I_2 - 2I_3 = -5$$

Solución En la pantalla HOME (INICIO) seleccione el icono de ecuaciones simultáneas.



Oprima ENTER. Select 3:New, luego oprima ENTER otra vez. A continuación especifique el número de ecuaciones y el número de incógnitas y luego oprima ENTER. En la pantalla de ecuaciones simultáneas ingrese los coeficientes y las constantes como indica la figura 9-5(a). Oprima ENTER después de cada número.



▲ FIGURA 9–5

Una vez que haya ingresado los coeficientes y las constantes, oprima la tecla F5 para resolver. Como se indica en la pantalla de la parte (b), los resultados aparecen como fracciones. Concuerdan con los resultados obtenidos en la calculadora TI-86, los cuales aparecieron en forma decimal.

Problema relacionado Repita el problema relacionado del ejemplo 9-5 con la calculadora TI-89.

REPASO DE LA SECCIÓN 9-1

1. Evalúe los siguientes determinantes:

   (a) $\begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 4 & 8 \end{vmatrix}$ (b) $\begin{vmatrix} 0.25 & 0.33 \\ -0.5 & 1 \end{vmatrix}$ (c) $\begin{vmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 2 & -1 & 7 \\ -4 & 0 & -2 \end{vmatrix}$

2. Configure el determinante característico para el siguiente conjunto de ecuaciones simultaneas:

$$2I_1 + 3I_2 = 0$$
$$5I_1 + 4I_2 = 1$$

3. Determine I_2 en la pregunta 2.
4. Use su calculadora para resolver el siguiente conjunto de ecuaciones simultáneas para I_1, I_2, I_3 e I_4.

$$100I_1 + 220I_2 + 180I_3 + 330I_4 = 0$$
$$470I_1 + 390I_2 + 100I_3 + 100I_4 = 12$$
$$120I_1 - 270I_2 + 150I_3 - 180I_4 = -9$$
$$560I_1 + 680I_2 - 220I_3 + 390I_4 = 0$$

5. **Modifique las ecuaciones de la pregunta 4 cambiando la constante en la primera ecuación a 8.5, el coeficiente de I_3 en la segunda ecuación a 220, y el coeficiente de I_1 en la cuarta ecuación a 330. Resuelva el nuevo conjunto de ecuaciones para las corrientes.**

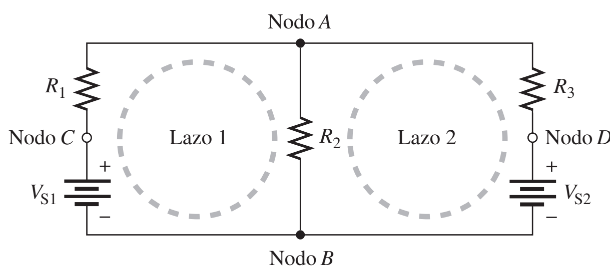
9–2 Método de la corriente en ramas

El método de la corriente en ramas es un método de análisis de circuitos que utiliza las leyes del voltaje y de la corriente de Kirchhoff para determinar la corriente que circula en cada rama de un circuito generando ecuaciones simultáneas. Una vez que se conocen las corrientes presentes en las ramas, se pueden determinar los voltajes.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar el método de la corriente en ramas para determinar cantidades desconocidas en un circuito**
  - Identificar lazos y nodos en un circuito
  - Desarrollar un conjunto de ecuaciones de la corriente en ramas
  - Resolver las ecuaciones de la corriente en ramas

La figura 9-6 muestra un circuito que se utilizará como modelo básico a lo largo de todo el capítulo para ilustrar cada uno de los tres métodos de análisis de circuitos. En este circuito, hay sólo dos lazos no redundantes. Un **lazo** es una trayectoria completa para la corriente que circula en un circuito, y un conjunto de lazos no redundantes puede ser visto como un conjunto de "marcos de ventana", donde cada marco representa un lazo no redundante. Además, hay cuatro nodos indicados mediante las letras A, B, C y D. Un **nodo** es un punto donde se conectan dos o más componentes. Una **rama** es una trayectoria que conecta dos nodos, y en este circuito hay tres ramas: una que contiene R_1, otra que contiene R_2, y una más conteniendo a R_3.



▶ **FIGURA 9–6**

Circuito que muestra lazos, nodos y ramas.

Los siguientes son los pasos generales utilizados al aplicar el método de la corriente en ramas.

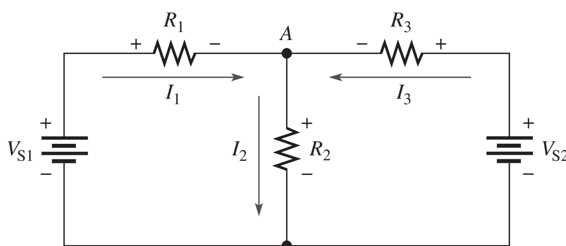
Paso 1. Asignar una corriente a cada rama del circuito en una dirección arbitraria.

Paso 2. Indicar las polaridades de los voltajes presentes en los resistores de acuerdo con las direcciones de las corrientes asignadas a las ramas.

Paso 3. Aplicar la ley del voltaje de Kirchhoff alrededor de cada lazo (la suma algebraica de los voltajes es igual a cero).

Paso 4. Aplicar la ley de la corriente de Kirchhoff en el número mínimo de nodos de modo que todas las corrientes de rama estén incluidas (la suma algebraica de las corrientes que entran o salen a un nodo es igual a cero).

Paso 5. Resolver las ecuaciones resultantes de los pasos 3 y 4 para determinar los valores de las corrientes de rama.



◀ **FIGURA 9–7**

Circuito para demostrar el análisis de corrientes de rama.

Estos pasos se demuestran con ayuda de la figura 9-7. Primero, se asignan las **corrientes de rama** I_1, I_2 e I_3 en la dirección mostrada. No hay que preocuparse por las direcciones reales de la corriente en este momento. En segundo lugar, las polaridades de las caídas de voltaje entre los extremos de los resistores R_1, R_2 y R_3 se indican en la figura de acuerdo con las direcciones de las corrientes asignadas. En tercer lugar, la ley del voltaje de Kirchhoff aplicada a los dos lazos proporciona las siguientes ecuaciones, donde los valores de resistencia son los coeficientes de las corrientes desconocidas:

Ecuación 1: $R_1I_1 + R_2I_2 - V_{S1} = 0$ para el lazo 1

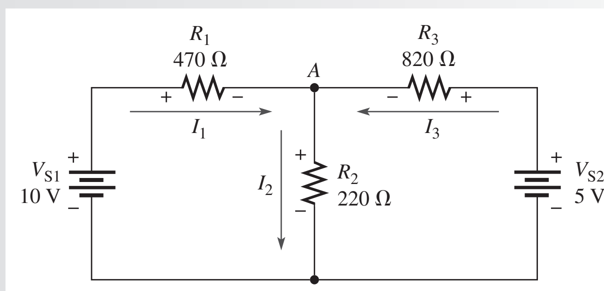
Ecuación 2: $R_2I_2 + R_3I_3 - V_{S2} = 0$ para el lazo 2

En cuarto lugar, la ley de la corriente de Kirchhoff se aplica al nodo *A*, con todas las corrientes de rama como sigue:

Ecuación 3: $I_1 - I_2 + I_3 = 0$

El signo negativo indica que I_2 está afuera del nodo. En quinto lugar, y por último, las tres ecuaciones deben ser resueltas para las tres corrientes desconocidas, I_1, I_2 e I_3. El ejemplo 9-7 muestra cómo resolver ecuaciones por el método de *sustitución*.

EJEMPLO 9–7 Use el método de la corriente de ramas para cada una de las corrientes de rama ilustradas en la figura 9-8.



▲ **FIGURA 9–8**

Solución

Paso 1: Asigne las corrientes de rama según muestra la figura 9-8. Tenga en cuenta que puede suponer cualquier dirección de corriente en este momento, y que la solución final tendrá un signo negativo si la corriente real se opone a la corriente asignada.

Paso 2: Marque las polaridades de las caídas de voltaje en los resistores de acuerdo con las direcciones de corriente asignadas como indica la figura.

Paso 3: Aplicando la ley del voltaje de Kirchhoff alrededor del lazo izquierdo se obtiene

$$470I_1 + 220I_2 - 10 = 0$$

Alrededor del lazo derecho se obtiene

$$220I_2 + 820I_3 - 5 = 0$$

donde todos los valores de resistencia están en ohms y los de voltaje en volts. Por simplicidad, no se muestran las unidades.

Paso 4: En el nodo A, la ecuación de corriente es

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

Paso 5: Las ecuaciones se resuelven por sustitución como sigue. En primer lugar, encuentre I_1 en función de I_2 e I_3.

$$I_1 = I_2 - I_3$$

Ahora, sustituya I_1 por $I_2 - I_3$ en la ecuación para el lazo izquierdo.

$$470(I_2 - I_3) + 220I_2 = 10$$
$$470I_2 - 470I_3 + 220I_2 = 10$$
$$690I_2 - 470I_3 = 10$$

A continuación, escriba la ecuación para el lazo derecho y resuélvala para I_2 en función de I_3.

$$220I_2 = 5 - 820I_3$$
$$I_2 = \frac{5 - 820I_3}{220}$$

Al sustituir esta expresión para I_2 en $820I_2 - 470I_3 = 10$ se obtiene

$$690\left(\frac{5 - 820I_3}{220}\right) - 470I_3 = 10$$
$$\frac{3450 - 565800I_3}{220} - 470I_3 = 10$$
$$15.68 - 2571.8I_3 - 470I_3 = 10$$
$$-3041.8I_3 = -5.68$$
$$I_3 = \frac{5.68}{3041.8} = 0.00187 \text{ A} = \mathbf{1.87\ mA}$$

Ahora, sustituya el valor de I_3 en amperes en la ecuación para el lazo derecho.

$$220I_2 + 820(0.00187) = 5$$

Resuélvala para I_2.

$$I_2 = \frac{5 - 820(0.00187)}{220} = \frac{3.47}{220} = 0.0158 = \mathbf{15.8\ mA}$$

Al sustituir los valores de I_2 e I_3 en la ecuación de corriente en el nodo A se obtiene

$$I_1 - 0.0158 + 0.00187 = 0$$
$$I_1 = 0.0158 - 0.00187 = 0.0139 \text{ A} = \mathbf{13.9\ mA}$$

Problema relacionado Determine las corrientes de rama en la figura 9-8 con la polaridad de la fuente de 5 V invertida.



Use el archivo Multisim E09-07 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 9-2

1. ¿Qué leyes de circuito básicas se utilizan en el método de la corriente en ramas?
2. Cuando se asignan corrientes de rama, deberá tenerse cuidado de que la direcciones asignadas concuerden con las direcciones reales. (F o V)
3. ¿Qué es un lazo?
4. ¿Qué es un nodo?

9–3 MÉTODO DE LA CORRIENTE DE LAZO

En el método de la corriente de lazo (también conocido como método de corrientes), se trabajará con corrientes de lazo en lugar de corrientes de rama. Un amperímetro colocado en una rama dada medirá la corriente que circula por esa rama. A diferencia de las corrientes de rama, las de lazo son cantidades matemáticas, y no corrientes físicas reales, que se utilizan para volver al análisis de circuitos un poco más fácil de lo que resulta con el método de corrientes de rama.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar el análisis de lazos para encontrar cantidades desconocidas en un circuito**
  - Asignar corrientes de lazo
  - Aplicar la ley del voltaje de Kirchhoff alrededor de cada lazo
  - Desarrollar las ecuaciones de lazo
  - Resolver las ecuaciones de lazo

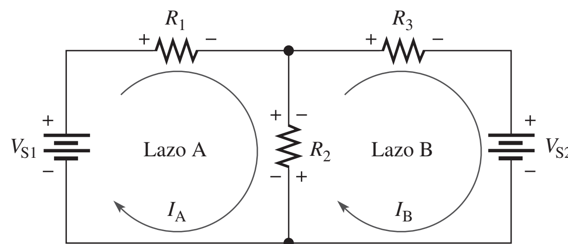
En los pasos siguientes se proporciona un método sistemático para efectuar el análisis de lazos y se ilustra en la figura 9-9, la cual es la misma configuración de circuito utilizada en el análisis de corrientes de rama. Esta configuración demuestra muy bien los principios básicos.

Paso 1. Aunque la dirección asignada a una corriente de lazo es arbitraria, se asignará una corriente en el sentido de las manecillas del reloj (SMR) alrededor de cada lazo no redundante, por consistencia. Ésta puede no ser la dirección de la corriente real, pero no importa. El número de asignaciones de corrientes de lazo debe ser suficiente para incluir las corrientes que circulan a través de todos los componentes del circuito.

Paso 2. Indicar las polaridades de las caídas de voltaje en cada lazo con base en las direcciones de corriente asignadas.

Paso 3. Aplicar la ley del voltaje de Kirchhoff alrededor de cada lazo. Cuando más de una corriente de lazo pasa a través de un componente, se deberá incluir su caída de voltaje. Esto produce una ecuación para cada lazo.

Paso 4. Resolver las ecuaciones resultantes para las corrientes de lazo utilizando sustitución o determinantes.



▲ FIGURA 9–9

En primer lugar, las **corrientes de lazo** I_A e I_B se asignan en el sentido de las manecillas del reloj como indica la figura 9-9. Se podría asignar una corriente de lazo alrededor del perímetro externo del circuito, pero esto sería redundante puesto que I_A e I_B ya pasan a través de todos los componentes.

En segundo lugar, las polaridades de las caídas de voltaje entre los extremos de R_1, R_2 y R_3 se muestran basadas en la direcciones de las corrientes de lazo. Observe que I_A e I_B están en direcciones opuestas a través de R_2 porque R_2 es común a ambos lazos. Por consiguiente, se indican dos polaridades de voltaje. En realidad, la corriente en R_2 no puede ser separada en dos partes,

pero recuerde que las corrientes de lazo son básicamente cantidades matemáticas utilizadas para propósitos de análisis. Las polaridades de las fuentes de voltaje son fijas y no se ven afectadas por las asignaciones de corriente.

En tercer lugar, la ley del voltaje de Kirchhoff aplicada a los dos lazos produce las dos ecuaciones siguientes:

$$R_1I_A + R_2(I_A - I_B) = V_{S1} \qquad \text{por el lazo A}$$
$$R_3I_B + R_2(I_B - I_A) = -V_{S2} \qquad \text{por el lazo B}$$

Advierta que I_A es positiva en el lazo A e I_B es positiva en el lazo B.

En cuarto lugar, los términos similares presentes en las ecuaciones se combinan y reordenan en la forma estándar para obtener una solución conveniente de modo que tengan la misma posición en cada ecuación, es decir, el término I_A va primero e I_B se coloca en segundo lugar. Las ecuaciones se reordenan en la siguiente forma. Una vez que se evalúan las corrientes de lazo, todas las corrientes de rama pueden ser determinadas.

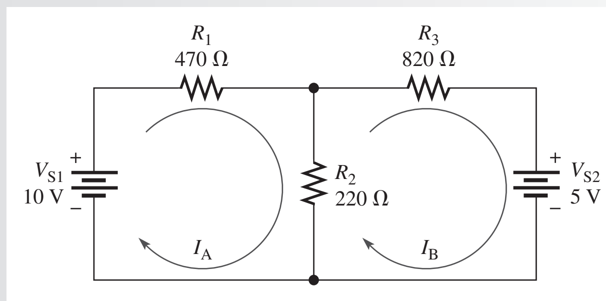
$$(R_1 + R_2)I_A - R_2I_B = V_{S1} \qquad \text{por el lazo A}$$
$$-R_2I_A + (R_2 + R_3)I_B = -V_{S2} \qquad \text{por el lazo B}$$

Advierta que en el método de corrientes de lazo se requieren sólo dos ecuaciones para el mismo circuito que requería tres en el método de corrientes de rama. Las dos últimas ecuaciones (desarrolladas en el cuarto paso) siguen una forma que facilita el análisis de lazos. Al remitirnos a estas dos últimas ecuaciones se observa que, para el lazo *A*, la resistencia total en ella, $R_1 + R_2$, está multiplicada por I_A (su corriente de lazo). Asimismo, en la ecuación para el lazo A, la resistencia común a ambos lazos, R_2, está multiplicada por la otra corriente de lazo, I_B, y restada del primer término. Se observa la misma forma en la ecuación para el lazo B, excepto que los términos han sido reordenados. De estas observaciones, se deriva la siguiente regla concisa para aplicar los pasos 1 a 4:

(La suma de los resistores dispuestos en un lazo) multiplicada por (la corriente de lazo) menos (cada resistor común a ambos lazos) multiplicado por (la corriente del lazo asociada adyacente) es igual (al voltaje de fuente presente en el lazo).

El ejemplo 9-8 ilustra la aplicación de esta regla al análisis de la corriente en lazos de un circuito.

EJEMPLO 9–8 En la figura 9-10, encuentre las corrientes de rama utilizando el método de la corriente en lazos.



▲ **FIGURA 9–10**

Solución Asigne la corriente de lazo (I_A e I_B) como indica la figura 9-10; los valores de resistencia están en ohms y los de voltaje en volts. Use la regla descrita para escribir las ecuaciones de lazo.

$$(470 + 220)I_A - 220I_B = 10$$
$$690I_A - 220I_B = 10 \qquad \text{para el lazo A}$$
$$-220I_A + (220 + 820)I_B = -5$$
$$-220I_A + 1040I_B = -5 \qquad \text{para el lazo B}$$

Use determinantes para encontrar I_A.

$$I_A = \frac{\begin{vmatrix} 10 & -220 \\ -5 & 1040 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 690 & -220 \\ -220 & 1040 \end{vmatrix}} = \frac{(10)(1040) - (-5)(-220)}{(690)(1040) - (-220)(-220)} = \frac{104000 - 1100}{717600 - 48400} = \frac{102900}{669200} = 13.9\text{ mA}$$

Al resolver para I_B se obtiene

$$I_B = \frac{\begin{vmatrix} 690 & 10 \\ -220 & -5 \end{vmatrix}}{669200} = \frac{(690)(-5) - (-220)(10)}{669200} = \frac{-3450 - (-2200)}{669200} = -1.87\text{ mA}$$

El signo negativo en I_B significa que su dirección asignada es opuesta a la corriente real.

Ahora determine las corrientes de rama reales. Como I_A es la única corriente que circula a través de R_1, también es la corriente de rama I_1.

$$I_1 = I_A = \mathbf{13.9\text{ mA}}$$

Como I_B es la única corriente que circula a través de R_3, también es la corriente de rama I_3.

$$I_3 = I_B = \mathbf{-1.87\text{ mA}}$$

El signo negativo indica una dirección opuesta a la originalmente asignada a I_B.

Dado que fueron asignadas al principio, las corrientes I_A e I_B circulan por R_2 en direcciones opuestas. La corriente de rama I_2 es la diferencia entre I_A e I_B.

$$I_2 = I_A - I_B = 13.9\text{ mA} - (-1.87\text{ mA}) = \mathbf{15.8\text{ mA}}$$

Tenga en cuenta que una vez conocidas las corrientes de rama, se pueden encontrar los voltajes mediante la ley de Ohm. Observe que estos resultados son los mismos del ejemplo 9-7 donde se utilizó el método de corriente de rama.

Problema relacionado Resuelva para las dos corrientes de lazo con su calculadora.



Use el archivo Multisim E09-08 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para verificar sus cálculos en el problema relacionado.

Circuitos con más de dos lazos

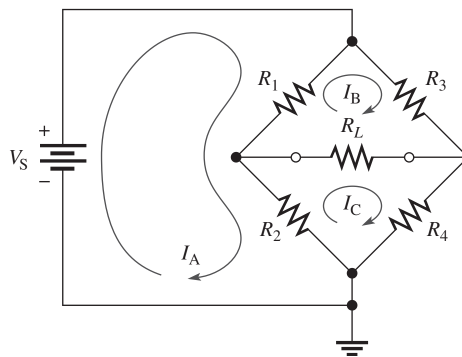
El método de la corriente en lazos puede ser sistemáticamente aplicado a circuitos que tengan cualquier cantidad de lazos. Desde luego, mientras más lazos haya, más difícil será encontrar la solución, pero las calculadoras han simplificado en gran medida la resolución de ecuaciones simultáneas. La mayor parte de los circuitos con que usted se encontrará no tendrá más de tres lazos. Recuerde que las corrientes de lazo no son corrientes físicas reales sino cantidades matemáticas asignadas para propósitos de análisis.

Un circuito ampliamente utilizado con el que ya se topó usted es el puente Wheatstone. Éste originalmente se diseñó como un instrumento de medición autónomo, pero ha sido reemplazado en gran medida por otros instrumentos. No obstante, el circuito puente Wheatstone se encuentra incorporado en instrumentos de medición automáticos, y como previamente se explicó, se utiliza mucho en la industria de las básculas y en otras aplicaciones de medición.

Un método para determinar los parámetros del puente, y que conduce directamente a encontrar la corriente en cada brazo del puente y la corriente de carga, es escribir ecuaciones de lazo para el puente. La figura 9-11 muestra un puente Wheatstone con tres lazos. El ejemplo 9-9 ilustra cómo se determinan todas las corrientes presentes en el puente.

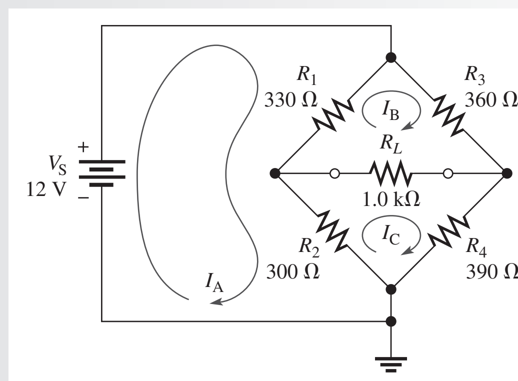
▶ **FIGURA 9–11**

Puente Wheatstone con tres lazos.



EJEMPLO 9–9 Para el circuito de la figura 9-12, encuentre las corrientes de lazo. Use las corrientes de lazo para determinar la corriente en cada resistor (corriente de rama).

▶ **FIGURA 9–12**



Solución Asigne tres corrientes de lazo en el sentido de las manecillas del reloj (I_A, I_B e I_C) tal como indica la figura 9-12. Luego escriba las ecuaciones para los lazos. Éstas son:

Lazo A: $-12 + 330(I_A - I_B) + 330(I_A - I_C) = 0$
Lazo B: $330(I_B - I_A) + 360I_B + 1000(I_B - I_C) = 0$
Lazo C: $300(I_C - I_A) + 1000(I_C - I_B) + 390I_C = 0$

Reordene las ecuaciones en la forma estándar:

Lazo A: $630I_A - 330I_B - 300I_C = 12\text{ V}$
Lazo B: $-330I_A + 1690I_B - 1000I_C = 0$
Lazo C: $-300I_A - 1000I_B + 1690I_C = 0$

Se pueden resolver estas ecuaciones por sustitución, pero es tedioso con tres incógnitas. El método de determinantes o la solución directa con su calculadora son formas más simples. Las unidades no se muestran sino hasta el final del problema.

El determinante característico se evalúa con el método de expansión,

$$\left|\begin{array}{ccc|cc} 630 & -330 & -300 & 630 & -330 \\ -330 & 1690 & -1000 & -330 & 1690 \\ -300 & -1000 & 1690 & -300 & -1000 \end{array}\right.$$

$$= [(630)(1690)(1690) + (-330)(-1000)(-300) + (-300)(-330)(-1000)]$$
$$-[(-300)(1690)(-300) + (-1000)(-1000)(630) + (1690)(-330)(-330)]$$
$$= 635202000$$

Al resolver para I_A:

$$\frac{\begin{vmatrix} 12 & -330 & -300 \\ 0 & 1690 & -1000 \\ 0 & -1000 & 1690 \end{vmatrix}}{635202000} = \frac{(12)(1690)(1690) - (12)(-1000)(-1000)}{635202000} = 0.0351\text{ A} = 35.1\text{ mA}$$

Al resolver para I_B:

$$\frac{\begin{vmatrix} 630 & 12 & -300 \\ -330 & 0 & 1000 \\ -300 & 0 & 1690 \end{vmatrix}}{635202000} = \frac{(12)(-1000)(-300) - (-330)(12)(1690)}{635202000} = 0.0162\text{ A} = 16.2\text{ mA}$$

Al resolver para I_C:

$$\frac{\begin{vmatrix} 630 & -330 & 12 \\ -330 & 1690 & 0 \\ -300 & -1000 & 0 \end{vmatrix}}{635202000} = \frac{(12)(-330)(-1000) - (-300)(1690)(12)}{635202000} = 0.0158\text{ A} = 15.8\text{ mA}$$

La corriente en R_1 es la diferencia entre I_A e I_B:

$$I_1 = (I_A - I_B) = 35.1\text{ mA} - 16.2\text{ mA} = \mathbf{18.9\text{ mA}}$$

La corriente en R_2 es la diferencia entre I_A e I_C:

$$I_2 = (I_A - I_C) = 35.1\text{ mA} - 15.8\text{ mA} = \mathbf{19.3\text{ mA}}$$

La corriente en R_3 es I_B:

$$I_3 = I_B = \mathbf{16.2\text{ mA}}$$

La corriente en R_4 es I_C:

$$I_4 = I_C = \mathbf{15.8\text{ mA}}$$

La corriente en R_L es la diferencia entre I_B e I_C:

$$I_L = (I_B - I_C) = 16.2\text{ mA} - 15.8\text{ mA} = \mathbf{0.4\text{ mA}}$$

Problema relacionado Use una calculadora para verificar las corrientes de lazo encontradas en este ejemplo.

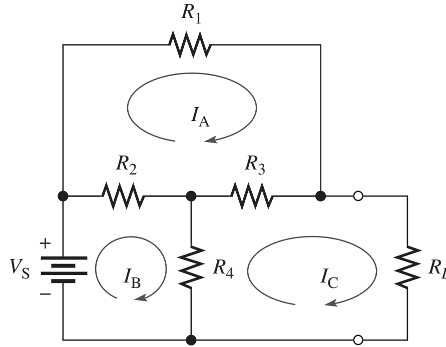


Use el archivo Multisim E09-09 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

Otro circuito útil de tres lazos es el circuito puente T. Si bien este circuito se aplica principalmente en circuitos filtro de ca que utilizan componentes reactivos, se introduce aquí para ilustrar la solución de circuitos de tres lazos. En la figura 9-13 se muestra un circuito puente T.

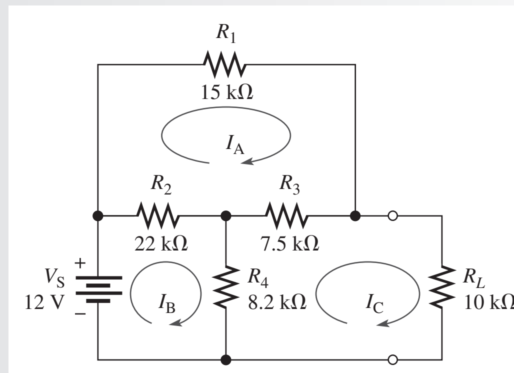
Los resistores con frecuencia estarán en kΩ (o incluso en MΩ), de tal suerte que los coeficientes de las ecuaciones simultáneas llegarán a ser bastante grandes si aparecen explícitamente en la solución de las ecuaciones. Para simplificar el ingreso y resolución de ecuaciones con kΩ, es práctica común eliminar los kΩ en las ecuaciones y reconocer que la unidad de corriente es el mA si el voltaje está en volts. El siguiente ejemplo de un circuito puente T ilustra esta idea.

▶ FIGURA 9–13



EJEMPLO 9–10 La figura 9-14 muestra un circuito puente T y tres lazos. Escriba las ecuaciones en la forma estándar para las corrientes de lazo. Resuelva las ecuaciones con una calculadora para determinar la corriente en cada resistor.

▶ FIGURA 9–14



Solución Asigne tres corrientes de lazo en el sentido de las manecillas del reloj (I_A, I_B e I_C) como indica la figura 9-14. Escriba las ecuaciones de lazo, pero elimine el prefijo k de las resistencias. La corriente estará en mA.

$$\text{Lazo A:} \quad 22(I_A - I_B) + 15I_A + 7.5(I_A - I_C) = 0$$
$$\text{Lazo B:} \quad -12 + 22(I_B - I_A) + 8.2(I_B - I_C) = 0$$
$$\text{Lazo C:} \quad 8.2(I_C - I_B) + 7.5(I_C - I_A) + 10I_C = 0$$

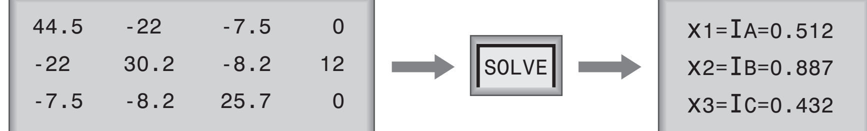
Reacomode las ecuaciones en la forma estándar:

$$\text{Lazo A:} \quad 44.5I_A - 22I_B - 7.5I_C = 0$$
$$\text{Lazo B:} \quad -22I_A + 30.2I_B - 8.2I_C = 12$$
$$\text{Lazo C:} \quad -7.5I_A - 8.2I_B + 25.7I_C = 0$$

Solución mediante calculadora: La solución con calculadora requiere el ingreso del número de ecuaciones (3), los coeficientes y las constantes. La función SOLVE de la calculadora produce los resultados mostrados en la figura 9-15. Como los resistores estaban en kΩ, la unidad para las corrientes de lazo está en mA. Determine la corriente en cada resistor. La corriente en $R_1 = I_A$.

$$I_1 = \mathbf{0.512\ mA}$$

▶ FIGURA 9–15



La corriente en R_2 es la diferencia entre I_A e I_B.

$$I_2 = (I_A - I_B) = 0.512\text{ mA} - 0.887\text{ mA} = \mathbf{-0.375\text{ mA}}$$

El signo negativo indica que la dirección de la corriente se opone a la de I_A; el lado positivo del resistor es el lado derecho.

La corriente en R_3 es $I_A - I_C$.

$$I_3 = 0.512\text{ mA} - 0.432\text{ mA} = \mathbf{0.08\text{ mA}}$$

La corriente en R_4 es $I_B - I_C$.

$$I_4 = I_B - I_C = 0.887\text{ mA} - 0.432\text{ mA} = \mathbf{0.455\text{ mA}}$$

La corriente en R_L es I_C:

$$I_L = \mathbf{0.432\text{ mA}}$$

Problema relacionado Determine el voltaje presente entre los extremos de cada resistor.



Use el archivo Multisim E09-10 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 9-3

1. ¿Necesariamente representan las corrientes de lazo las corrientes reales que circulan en las ramas?
2. Cuando se determina la corriente con el método de lazos y se obtiene un valor negativo, ¿qué significa esto?
3. ¿Qué ley de circuito se utiliza en el método de la corriente en lazos?

9–4 MÉTODO DEL VOLTAJE EN NODOS

Otro método de análisis de circuitos de lazos múltiples se denomina método del voltaje en nodos. Se basa en la determinación de los voltajes presentes en cada nodo del circuito mediante la ley de la corriente de Kirchhoff. Recuerde que un nodo es la unión de dos o más componentes.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

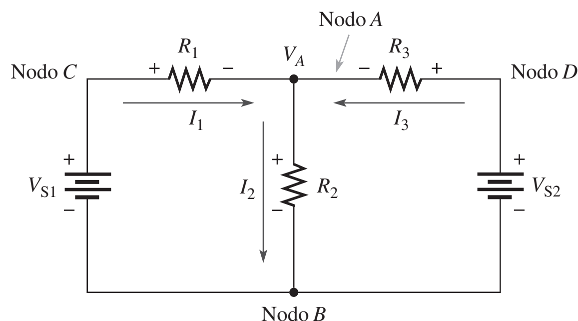
- **Utilizar el análisis de nodos para determinar cantidades desconocidas en un circuito**
  - Seleccionar los nodos en los cuales se desconoce el voltaje y asignar corrientes
  - Aplicar la ley de la corriente de Kirchhoff en cada nodo
  - Desarrollar y resolver las ecuaciones de nodo

Los pasos generales para aplicar el método del voltaje en nodos al análisis de circuitos son los siguientes:

Paso 1. Determinar el número de nodos.
Paso 2. Seleccionar un nodo como referencia. Todos los voltajes serán con respecto al nodo de referencia. Asignar designaciones de voltaje a cada nodo donde el voltaje es desconocido.
Paso 3. Asignar corrientes en cada nodo donde se desconoce el voltaje, excepto en el nodo de referencia. Las direcciones son arbitrarias.
Paso 4. Aplicar la ley de la corriente de Kirchhoff a cada nodo donde se asignan las corrientes.
Paso 5. Expresar las ecuaciones de corriente en función de voltajes, y resolver las ecuaciones para determinar los voltajes de nodo desconocidos mediante la ley de Ohm.

▶ **FIGURA 9–16**

Circuito para análisis de voltaje en nodos.



Se utilizará la figura 9-16 para ilustrar el método general de abordar el análisis de los voltajes de nodo. En primer lugar, se establecen los nodos. En este caso, existen cuatro, como indica la figura. En segundo lugar, se elegirá el nodo *B* como referencia. Piense en él como la tierra de referencia del circuito. Se observa que los voltajes de nodos *C* y *D* son los voltajes de las fuentes. El voltaje en el nodo *A* es el único desconocido; se le designa como V_A. En tercer lugar, se asignan arbitrariamente las corrientes de rama en el nodo *A* según indica la figura. En cuarto lugar, la ecuación de Kirchhoff para encontrar la corriente en el nodo *A* es

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

En quinto lugar, se expresan las corrientes en función de voltajes de circuito utilizando la ley de Ohm.

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_{S1} - V_A}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_A}{R_2}$$

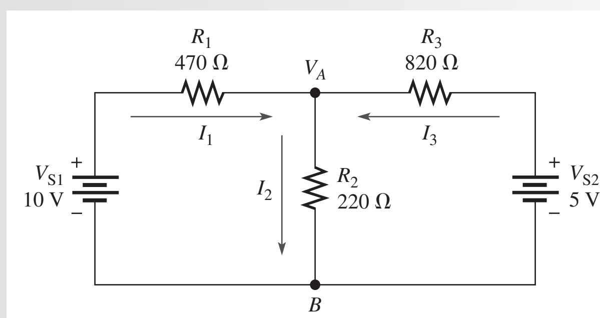
$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{V_{S3} - V_A}{R_3}$$

Al sustituir estos términos en la ecuación de corriente se obtiene

$$\frac{V_{S1} - V_A}{R_1} - \frac{V_A}{R_2} + \frac{V_{S2} - V_A}{R_3} = 0$$

La única incógnita es V_A; así que la única ecuación se resuelve combinando y reordenando los términos. Una vez que se conoce el voltaje, es posible calcular todas las corrientes de rama. El ejemplo 9-11 ilustra este método más a fondo.

EJEMPLO 9–11 Encuentre el voltaje de nodo V_A en la figura 9-17 y determine las corrientes de rama.



▲ **FIGURA 9–17**

Solución El nodo de referencia se elige en B. El voltaje desconocido del nodo es V_A, según indica la figura 9-17. Éste es el único voltaje desconocido. Las corrientes de rama se asignan en el nodo A como se muestra. La ecuación de corriente es

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

Al sustituir las corrientes utilizando la ley de Ohm se obtiene la ecuación en función de los voltajes.

$$\frac{10 - V_A}{470} - \frac{V_A}{220} + \frac{5 - V_A}{820} = 0$$

Al reordenar los términos se obtiene

$$\frac{10}{470} - \frac{V_A}{470} - \frac{V_A}{220} + \frac{5}{820} - \frac{V_A}{820} = 0$$

$$-\frac{V_A}{470} - \frac{V_A}{220} - \frac{V_A}{820} = -\frac{10}{470} - \frac{5}{820}$$

Para determinar V_A, combine los términos en ambos miembros de la ecuación y encuentre el denominador común.

$$\frac{1804V_A + 3854V_A + 1034V_A}{847880} = \frac{820 + 235}{38540}$$

$$\frac{6692V_A}{847880} = \frac{1055}{38540}$$

$$V_A = \frac{(1055)(847880)}{(6692)(38540)} = \mathbf{3.47\ V}$$

Ahora se pueden determinar las corrientes de rama.

$$I_1 = \frac{10\text{ V} - 3.47\text{ V}}{470\ \Omega} = \mathbf{13.9\ mA}$$

$$I_2 = \frac{3.47\text{ V}}{220\ \Omega} = \mathbf{15.8\ mA}$$

$$I_3 = \frac{5\text{ V} - 3.47\text{ V}}{820\ \Omega} = \mathbf{1.87\ mA}$$

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en los ejemplos 9-7 y 9-8 por medio de los métodos de rama y lazo.

Problema relacionado Determine V_A en la figura 9-17 con la fuente de 5 V invertida.



Use el archivo Multisim E09-11 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

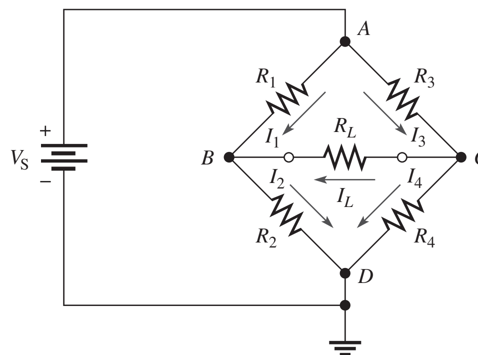
El ejemplo 9-11 ilustró una ventaja evidente del método de nodos. El método de la corriente en ramas requería de tres ecuaciones para las tres corrientes desconocidas. El método de la corriente en lazos reducía el número de ecuaciones simultáneas, pero requería el paso extra de convertir las corrientes de lazo ficticias en corrientes reales en los resistores. El método de nodos para el circuito de la figura 9-17 redujo las ecuaciones a una, y todas las ecuaciones se escribieron en función de un solo voltaje de nodo desconocido. El método del voltaje en nodos también tiene la ventaja de determinar voltajes desconocidos, los cuales son más fáciles de medir en forma directa que las corrientes.

Método del voltaje en nodos para un puente Wheatstone

El método del voltaje en nodos puede ser aplicado a un puente Wheatstone. En la figura 9-18 se muestra el puente Wheatstone con los nodos identificados y las corrientes indicadas. El nodo D

▶ **FIGURA 9–18**

Puente Wheatstone con asignaciones de nodos.



se elige casi siempre como el nodo de referencia, y el nodo A tiene el mismo potencial que el voltaje de fuente. Cuando se constituyen las ecuaciones para los dos voltajes de nodo desconocidos (B y C), es necesario especificar la dirección de la corriente como se describe en los pasos generales. La dirección de la corriente en R_L depende de las resistencias del puente; si la dirección asignada es incorrecta, la corriente aparecerá como negativa en la solución.

La ley de la corriente de Kirchhoff se escribe entonces para cada uno de los nodos desconocidos. Así, cada corriente se expresa en función de voltajes de nodo utilizando la ley de Ohm como sigue:

Nodo B:

$$I_1 + I_L = I_2$$

$$\frac{V_A - V_B}{R_1} + \frac{V_C - V_B}{R_L} = \frac{V_B}{R_2}$$

Nodo C:

$$I_3 = I_L + I_4$$

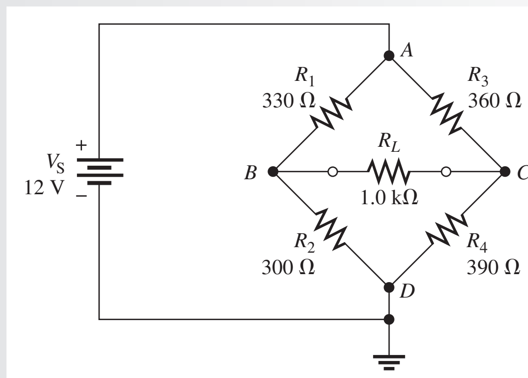
$$\frac{V_A - V_C}{R_3} = \frac{V_C - V_B}{R_L} + \frac{V_C}{R_4}$$

Las ecuaciones se escriben en la forma estándar y se resuelven aplicando cualquiera de los métodos aprendidos. El ejemplo siguiente ilustra esto para el puente Wheatstone resuelto mediante ecuaciones de lazo en el ejemplo 9-9.

EJEMPLO 9–12

Para el circuito de la figura 9-19, encuentre los voltajes presentes en los nodos B y C. El nodo D es la referencia, y el nodo A tiene el mismo voltaje que la fuente. Use los resultados para calcular la corriente que circula en cada resistor. Compare el resultado con el método de la corriente en lazos aplicado en el ejemplo 9-9.

▶ **FIGURA 9–19**



Solución Aplique la ley de la corriente de Kirchhoff en los nodos B y C en función de voltajes de nodo. Para mantener los coeficientes más manejables, todas las resistencias se muestran en kΩ; la corriente estará en mA.

Nodo B:

$$I_1 + I_L = I_2$$

$$\frac{V_A - V_B}{R_1} + \frac{V_C - V_B}{R_L} = \frac{V_B}{R_2}$$

$$\frac{12 - V_B}{0.330\,\text{k}\Omega} + \frac{V_C - V_B}{1.0\,\text{k}\Omega} = \frac{V_B}{0.300\,\text{k}\Omega}$$

Nodo C:

$$I_3 = I_L + I_4$$

$$\frac{V_A - V_C}{R_3} = \frac{V_C - V_B}{R_L} + \frac{V_C}{R_4}$$

$$\frac{12\,\text{V} - V_C}{0.360\,\text{k}\Omega} = \frac{V_C - V_B}{1.0\,\text{k}\Omega} + \frac{V_C}{0.390\,\text{k}\Omega}$$

Reacomode las ecuaciones para cada nodo en la forma estándar. Por conveniencia, las unidades no se muestran sino hasta el final del problema.

Nodo B: Multiplique cada término que aparece en la expresión para el nodo B por $R_1R_2R_L$ y combine los términos similares para obtener la forma estándar.

$$R_2R_L(V_A - V_B) + R_1R_2(V_C - V_B) = R_1R_LV_B$$

$$(1.0)(0.30)(12 - V_B) + (0.33)(0.30)(V_C - V_B) = (0.33)(1.0)V_B$$

$$0.729V_B - 0.099V_C = 3.6$$

Nodo C: Multiplique cada término que aparece en la expresión para el nodo C por $R_3R_4R_L$ y combine los términos similares para obtener la forma estándar.

$$R_4R_L(V_A - V_C) = R_3R_4(V_C - V_B) + R_3R_LV_C$$

$$(1.0)(0.39)(12 - V_C) = (0.36)(0.39)(V_C - V_B) + (0.36)(1.0)V_C$$

$$0.1404V_B - 0.8904V_C = -4.68$$

Las dos ecuaciones simultáneas se pueden resolver por sustitución, determinantes, o con calculadora. Resolviendo por determinantes,

$$0.729V_B - 0.099V_C = 3.6$$

$$0.1404V_B - 0.8904V_C = -4.68$$

$$V_B = \frac{\begin{vmatrix} 3.6 & -0.099 \\ -4.68 & -0.8904 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.729 & -0.099 \\ 0.1404 & -0.8904 \end{vmatrix}} = \frac{(3.6)(-0.8904) - (-0.099)(-4.68)}{(0.729)(-0.8904) - (0.1404)(-0.099)} = \mathbf{5.78\ V}$$

$$V_C = \frac{\begin{vmatrix} 0.729 & 3.6 \\ 0.1404 & -4.68 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 0.729 & -0.099 \\ 0.1404 & -0.8904 \end{vmatrix}} = \frac{(0.729)(-4.68) - (0.1404)(3.6)}{(0.729)(-0.8904)-(0.1404)(-0.099)} = \mathbf{6.17\ V}$$

Problema relacionado Con la ley de Ohm, determine la corriente que circula en cada resistor.



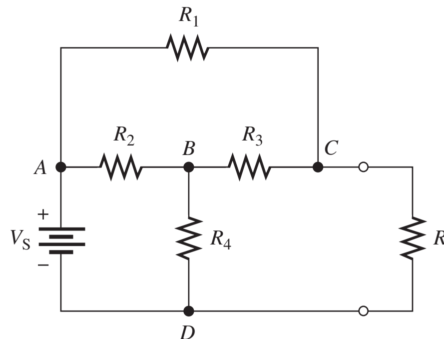
Use el archivo Multisim E09-12 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

Método del voltaje en nodos para el circuito puente T

Al aplicar el método del voltaje en nodos al circuito puente T se obtienen también dos ecuaciones con dos incógnitas. Igual que en el caso del puente Wheatstone, hay cuatro nodos como se muestra en la figura 9-20. El nodo *D* es la referencia y el *A* es el voltaje de fuente, de tal suerte que los dos voltajes desconocidos están en los nodos *C* y *D*. El efecto de un resistor de carga en el circuito es casi siempre la pregunta más importante, por lo que el voltaje en el nodo *C* es el objetivo principal. La solución de las ecuaciones simultáneas con una calculadora se simplifica para analizar el efecto de varias cargas porque solamente la ecuación para el nodo *C* se ve afectada cuando cambia la carga. El ejemplo 9-13 ilustra esta idea.

▶ **FIGURA 9–20**

Circuito puente T con asignaciones de nodos.

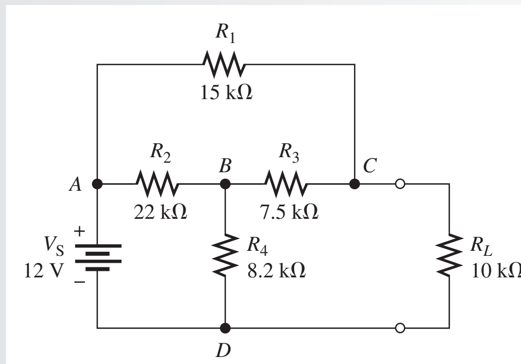


EJEMPLO 9–13 El circuito mostrado en la figura 9-21 es el mismo del ejemplo 9-10.

(a) Resuelva para el voltaje presente entre los extremos de R_L utilizando el análisis de nodos y una calculadora.

(b) Encuentre el efecto de la carga en el voltaje cuando el resistor de carga cambia a 15 kΩ.

▶ **FIGURA 9–21**



Solución **(a)** Aplique la ley de la corriente de Kirchhoff en los nodos *B* y *C* en función de voltajes de nodo. Para mantener los coeficientes más manejables, todas las resistencias se muestran en kΩ. La corriente estará en mA.

Nodo *B*:

$$I_2 = I_3 + I_4$$

$$\frac{V_A - V_B}{R_2} = \frac{V_B - V_C}{R_3} + \frac{V_B}{R_4}$$

$$\frac{12 - V_B}{22\,\text{k}\Omega} = \frac{V_B - V_C}{7.5\,\text{k}\Omega} + \frac{V_B}{8.2\,\text{k}\Omega}$$

Nodo C:

$$I_1 + I_3 = I_L$$
$$\frac{V_A - V_C}{R_1} + \frac{V_B - V_C}{R_3} = \frac{V_C}{R_L}$$
$$\frac{12\text{ V} - V_C}{15\text{ k}\Omega} + \frac{V_B - V_C}{7.5\text{ k}\Omega} = \frac{V_C}{10\text{ k}\Omega}$$

Reordene las ecuaciones para cada nodo en la forma estándar. Por conveniencia, las unidades se muestran hasta el final del problema.

Nodo B: Multiplique cada término de la ecuación para el nodo B por $R_2R_3R_4$ para eliminar el denominador. Combine los términos similares para obtener la forma estándar.

$$R_3R_4(V_A - V_B) = R_2R_4(V_B - V_C) + R_2R_3V_B$$
$$(7.5)(8.2)(12 - V_B) = (22)(8.2)(V_B - V_C) + (22)(7.5)V_B$$
$$406.9V_B - 180.4V_C = 738$$

Nodo C: Multiplique cada término de la ecuación para el nodo C por $R_1R_3R_L$ y combine los términos similares para obtener la forma estándar.

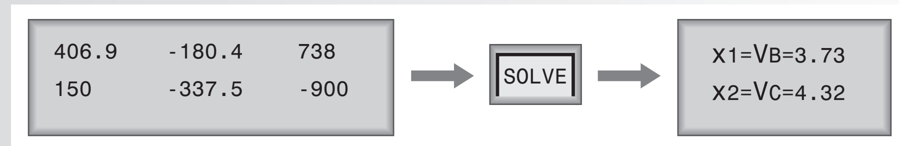
$$R_3R_L(V_A - V_C) + R_1R_L(V_B - V_C) = R_1R_3V_C$$
$$(7.5)(10)(12 - V_C) + (15)(10)(V_B - V_C) = (15)(7.5)V_C$$
$$150V_B - 337.5V_C = -900$$

Solución mediante calculadora: Las dos ecuaciones en la forma estándar son

$$406.9V_B - 180.4V_C = 738$$
$$150V_B - 337.5V_C = -900$$

Ingrese el número de ecuaciones (2), los coeficientes y las constantes en una calculadora para determinar V_B y V_C según muestra la figura 9-22. Como comprobación, observe que este voltaje implica que la corriente de carga es de 0.432 mA, lo cual concuerda con el resultado encontrado al aplicar el método de la corriente en lazos en el ejemplo 9-10.

▶ FIGURA 9–22



(b) Para calcular el voltaje presente en la carga con un resistor de carga de 15 kΩ, observe que la ecuación para el nodo B no resulta afectada. La ecuación para el nodo C se modifica como sigue:

$$\frac{12\text{ V} - V_C}{15\text{ k}\Omega} + \frac{V_B - V_C}{7.5\text{ k}\Omega} = \frac{V_C}{15\text{ k}\Omega}$$
$$(7.5)(15)(12 - V_C) + (15)(15)(V_B - V_C) = (15)(7.5)V_C$$
$$225V_B - 450V_C = -1350$$

Cambie los parámetros para la ecuación del nodo C y oprima "solve". El resultado es

$$V_C = V_L = \mathbf{5.02\ V}$$

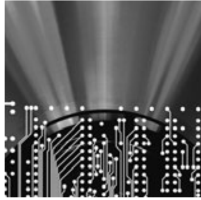
Problema relacionado Para la carga de 15 kΩ, ¿cuál es el voltaje en el nodo B?



Use el archivo Multisim E09-13 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 9-5

1. ¿Qué ley de circuito es el fundamento del método del voltaje en nodos?
2. ¿Qué es el nodo de referencia?



Una aplicación de circuito

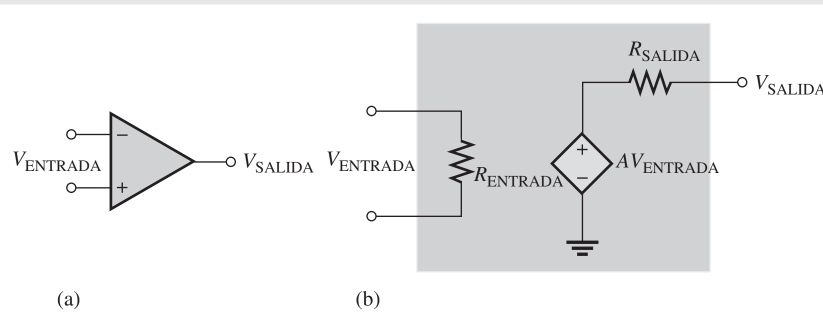
Las fuentes dependientes se estudiaron en el capítulo 8 y se aplicaron al modelado de transistores y amplificadores. En esta aplicación de circuito, se verá cómo un tipo particular de amplificador puede ser modelado y analizado aplicando los métodos introducidos en este capítulo. La idea no es aprender cómo trabajan los amplificadores porque eso queda fuera del alcance de este texto y se abordará en un curso posterior. Más bien la atención se concentra en la aplicación de métodos de análisis de circuitos a modelos de circuito. El amplificador simplemente se utiliza como ejemplo para ilustrar la manera en que se pueden aplicar métodos de análisis a un circuito práctico.

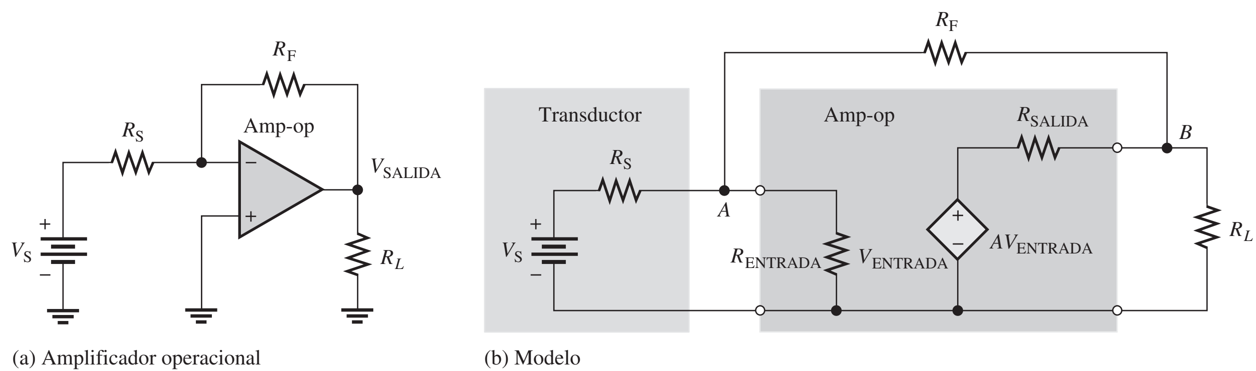
Los amplificadores operacionales son dispositivos de circuito integrado que se utilizan mucho en aplicaciones analógicas para procesamiento de señales. En la figura 9-23(a) se muestra un símbolo para amplificador operacional. El modelo de fuente dependiente equivalente aparece en la parte (b). La ganancia (A) de la fuente dependiente puede ser positiva o negativa, según esté configurada.

Suponga que se debe calcular a detalle el efecto de un circuito de amplificador operacional en un transductor que sirve como entrada. Algunos transductores, tales como medidores de pH, aparecen como un pequeño voltaje de fuente con una alta resistencia en serie. El transductor mostrado aquí está modelado como una pequeña fuente de voltaje de Thevenin de cd en serie con una resistencia de Thevenin de 10 kΩ.

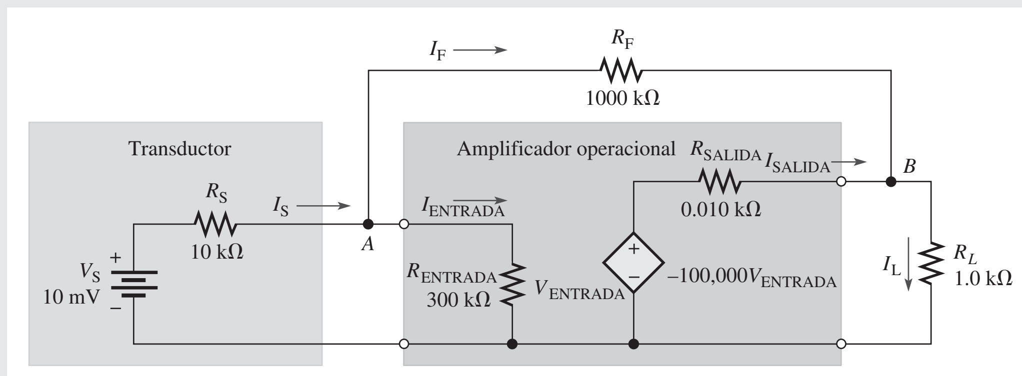
Se crean amplificadores prácticos utilizando un amplificador operacional con componentes externos. La figura 9-24(a) muestra un tipo de configuración de amplificador que incluye la resistencia Thevenin de la fuente junto con otros dos resistores externos. R_S representa la resistencia de fuente Thevenin. R_L está conectado de la salida del amplificador operacional a tierra como una carga, y R_F está conectado de la salida a la entrada como resistor de retroalimentación. Se utiliza retroalimentación en la mayoría de los circuitos de amplificador operacional, y simplemente es una trayectoria de regreso de la salida a la entrada. Ello tiene muchas ventajas, como se verá en un curso posterior.

▶ **FIGURA 9–23**





▲ **FIGURA 9–24**



▲ FIGURA 9–25

La figura 9-24(b) es el modelo de circuito equivalente de la fuente, el amplificador operacional, y la carga que se utilizarán para propósitos de análisis. La ganancia interna de la fuente dependiente, mostrada con la letra A en el bloque del amplificador operacional, es negativa porque se trata de un amplificador inversor (la salida tiene el signo opuesto de la entrada). Esta ganancia interna es en general extremadamente alta. Aunque es un número muy grande, la ganancia real del circuito con los componentes externos es mucho más baja porque está controlada por los componentes externos y no por la ganancia interna.

En la figura 9-25 se proporcionan los valores específicos para el circuito utilizado en esta aplicación junto con las corrientes asignadas. Todos los valores se muestran en kΩ para simplificar la anotación de los coeficientes en las ecuaciones que se utilizarán. Aun cuando los circuitos de amplificador operacional tienen excelentes aproximaciones simples para determinar el voltaje de salida, habrá ocasiones en que posiblemente se desee conocer la salida exacta. Puede aplicar su conocimiento de este capítulo al circuito para encontrar el voltaje de salida exacto.

El modelo de amplificador mostrado en la figura 9-25 puede ser analizado con más facilidad aplicando el método del voltaje en nodos porque sólo hay dos nodos, A y B, cuyos voltajes son desconocidos. En el nodo A, el voltaje se designa como V_A y es igual al de entrada al amplificador operacional ($V_{ENTRADA}$). En el nodo B, el voltaje se designa como V_B y también representa la salida (o voltaje en la carga), V_L. Los nombres y las direcciones de las corrientes se asignan como se muestra.

Análisis

Aplique la ley de la corriente de Kirchhoff en cada unos de los nodos desconocidos para escribir las ecuaciones de nodo.

Nodo A: $I_S = I_F + I_{ENTRADA}$
Nodo B: $I_{SALIDA} + I_F = I_L$

A continuación, se aplica la ley de Ohm y se establece $V_{ENTRADA} = V_A$. El voltaje de la fuente interna del amplificador operacional es $AV_{ENTRADA}$, por lo que se escribe AV_A para expresar las incógnitas en función de V_A y V_B.

$$\text{Nodo } A: \quad \frac{V_S - V_A}{R_S} = \frac{V_A}{R_{ENTRADA}} + \frac{V_A - V_B}{R_F}$$

$$\text{Nodo } B: \quad \frac{AV_A - V_B}{R_{SALIDA}} + \frac{V_A - V_B}{R_F} = \frac{V_B}{R_L}$$

Al expresar las ecuaciones en la forma estándar,

Nodo A:
$$-\left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_{ENTRADA}} + \frac{1}{R_F}\right)V_A + \left(\frac{1}{R_F}\right)V_B = -\left(\frac{1}{R_S}\right)V_S$$

Nodo B:
$$-\left(\frac{A}{R_{SALIDA}} + \frac{1}{R_F}\right)V_A + \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_{SALIDA}} + \frac{1}{R_F}\right)V_B = 0$$

- Sustituya los valores dados en la figura 9-25 en las ecuaciones de la forma estándar. Resuelva éstas para determinar $V_{ENTRADA}$ y V_L. (La resistencia puede ser ingresada en kΩ.)
- Calcule la corriente de entrada, $I_{ENTRADA}$, y la corriente en el resistor de retroalimentación, I_F.

Repaso

1. ¿Cambia el voltaje de salida si el resistor de carga R_L se duplica?
2. ¿Cambia el voltaje de salida si el resistor de retroalimentación se duplica?

RESUMEN

- Las ecuaciones simultáneas pueden ser resueltas por sustitución, por determinantes, o con una calculadora graficadora.
- El número de ecuaciones debe ser igual a la cantidad de incógnitas.
- Los determinantes de segundo grado se evalúan sumando los productos diagonales (con la asociación de signo para cada término).
- Los determinantes de tercer grado se evalúan por el método de expansión.

- El método de la corriente en ramas está basado en las leyes del voltaje y de la corriente de Kirchhoff.
- El método de la corriente en lazos está basado en la ley del voltaje de Kirchhoff.
- La corriente que circula en un lazo no es necesariamente la corriente real presente en una rama.
- El método del voltaje en nodos está basado en la ley de la corriente de Kirchhoff.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas utilizados en el capítulo se definen en el glosario incluido al final del libro.

Determinante Solución de una matriz compuesta por una tabla de coeficientes y constantes de un conjunto de ecuaciones simultáneas.

Ecuaciones simultáneas Conjunto de *n* ecuaciones que contiene *n* incógnitas, donde *n* es un número con un valor de 2 o más.

Lazo Trayectoria cerrada para la corriente que circula en un circuito.

Matriz Es una tabla de números.

Nodo Unión de dos o más componentes.

Rama Es una trayectoria para la corriente que conecta dos nodos.

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Suponiendo que se conocen los valores de la fuente de voltaje que aparecen en la figura 9-6, hay
(a) 3 lazos no redundantes **(b)** 1 nodo desconocido **(c)** 2 lazos no redundantes
(d) 2 nodos desconocidos **(e)** ambas respuestas (b) y (c)

2. Al asignar la dirección de las corrientes de rama,
(a) las direcciones son críticas **(b)** todas deben estar en la misma dirección
(c) todas deben dirigirse a un nodo **(d)** las direcciones no son críticas

3. El método de la corriente en ramas utiliza
(a) la ley de Ohm y la ley de la corriente de Kirchhoff
(b) las leyes del voltaje y de la corriente de Kirchhoff
(c) el teorema de superposición y la ley de la corriente de Kirchhoff
(d) el teorema de Thevenin y la ley del voltaje de Kirchhoff

4. Un determinante característico para dos ecuaciones simultáneas tendrá
(a) 2 filas y 1 columna **(b)** 1 fila y 2 columnas
(c) 2 filas y 2 columnas

5. La primera fila de cierto determinante tiene los números 2 y 4. La segunda fila tiene los números 6 y 1. El valor de este determinante es
(a) 22 **(b)** 2 **(c)** −22 **(d)** 8

6. El método de expansión para evaluar determinantes es
(a) bueno sólo para determinantes de segundo grado
(b) bueno tanto para determinantes de segundo como de tercer grado
(c) bueno para cualquier determinante
(d) más fácil que utilizar una calculadora

7. El método de la corriente en lazos está basado en
(a) la ley de la corriente de Kirchhoff **(b)** la ley de Ohm
(c) el teorema de superposición **(b)** la ley del voltaje de Kirchhoff

8. El método del voltaje en nodos está basado en
(a) la ley de la corriente de Kirchhoff **(b)** la ley de Ohm
(c) el teorema de superposición **(d)** la ley del voltaje de Kirchhoff

9. En el método del voltaje en nodos
(a) se asignan corrientes a cada nodo
(b) se asignan corrientes en el nodo de referencia
(c) las direcciones de las corrientes son arbitrarias

(**d**) se asignan corrientes sólo en los nodos donde el voltaje es desconocido
(**e**) ambas respuestas (c) y (d)

10. En general, el método del voltaje en nodos produce
(**a**) más ecuaciones que el método de la corriente en lazos
(**b**) menos ecuaciones que el método de la corriente en lazos
(**c**) el mismo número de ecuaciones que el método de la corriente en lazos

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 9-26.

1. Si R_2 se abre, la corriente a través de R_3
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

2. Si la fuente de 6 V se pone en cortocircuito, el voltaje en el punto A con respecto a tierra
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

3. Si R_2 se desconecta de tierra, el voltaje en el punto A con respecto a tierra
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 9-27.

4. Si la fuente de corriente se abre, la corriente a través de R_2
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

5. Si R_2 se abre, la corriente a través de R_3
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 9-30.

6. Si R_1 se abre, la magnitud del voltaje entre las terminales A y B
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

7. Si R_3 es reemplazado por un resistor de 10 Ω, V_{AB}
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

8. Si el punto B se pone en cortocircuito con la terminal negativa de la fuente, V_{AB}
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

9. Si la terminal negativa de la fuente se conecta a tierra, V_{AB}
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 9-32.

10. Si una fuente de voltaje V_{S2} se abre, el voltaje en A con respecto a tierra
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

11. Si se desarrolla un corto desde el punto A hasta tierra, la corriente a través de R_3
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

12. Si R_2 se abre, el voltaje entre los extremos de R_3
(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

PROBLEMAS

Un asterisco (*) indica los problemas más difíciles.
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 9–1 Ecuaciones simultáneas en el análisis de circuitos

1. Con el método de sustitución, resuelva el siguiente conjunto de ecuaciones para I_{R1} e I_{R2}.

$$100I_1 + 50I_2 = 30$$
$$75I_1 + 90I_2 = 15$$

2. Evalúe cada determinante:

(a) $\begin{vmatrix} 4 & 6 \\ 2 & 3 \end{vmatrix}$ **(b)** $\begin{vmatrix} 9 & -1 \\ 0 & 5 \end{vmatrix}$ **(c)** $\begin{vmatrix} 12 & 15 \\ -2 & -1 \end{vmatrix}$ **(d)** $\begin{vmatrix} 100 & 50 \\ 30 & -20 \end{vmatrix}$

3. Utilizando determinantes, resuelva el siguiente conjunto de ecuaciones para ambas corrientes:

$$-I_1 + 2I_2 = 4$$
$$7I_1 + 3I_2 = 6$$

4. Evalúe cada uno de los determinantes:

(a) $\begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 5 & 4 & 1 \\ 2 & 10 & 0 \end{vmatrix}$ **(b)** $\begin{vmatrix} 0.5 & 1 & -0.8 \\ 0.1 & 1.2 & 1.5 \\ -0.1 & -0.3 & 5 \end{vmatrix}$

5. Evalúe cada uno de los determinantes:

(a) $\begin{vmatrix} 25 & 0 & -20 \\ 10 & 12 & 5 \\ -8 & 30 & -16 \end{vmatrix}$ **(b)** $\begin{vmatrix} 1.08 & 1.75 & 0.55 \\ 0 & 2.12 & -0.98 \\ 1 & 3.49 & -1.05 \end{vmatrix}$

6. Determine I_3 en el ejemplo 9-4.

7. Resuelva para I_1, I_2, I_3 en el siguiente conjunto de ecuaciones con determinantes:

$$2I_1 - 6I_2 + 10I_3 = 9$$
$$3I_1 + 7I_2 - 8I_3 = 3$$
$$10I_1 + 5I_2 - 12I_3 = 0$$

***8.** Determine V_1, V_2, V_3 y V_4 resolviendo el siguiente conjunto de ecuaciones con una calculadora:

$$16V_1 + 10V_2 - 8V_3 - 3V_4 = 15$$
$$2V_1 + 0V_2 + 5V_3 + 2V_4 = 0$$
$$-7V_1 - 12V_2 + 0V_3 + 0V_4 = 9$$
$$-1V_1 + 20V_2 - 18V_3 + 0V_4 = 10$$

9. Resuelva las dos ecuaciones simultáneas del problema 1 con su calculadora.

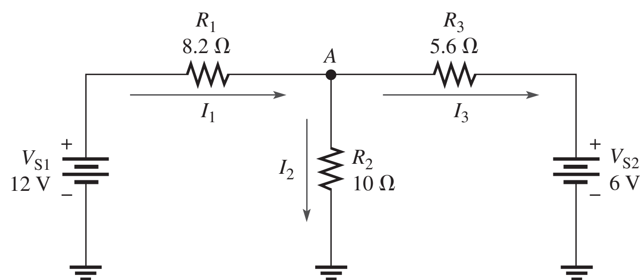
10. Resuelva las tres ecuaciones simultáneas del problema 7 con su calculadora.

SECCIÓN 9–2 Método de la corriente en ramas

11. Escriba la ecuación de la corriente de Kirchhoff para la asignación de corriente mostrada en el nodo *A* en la figura 9-26.

12. Resuelva para cada una de las corrientes de rama ilustradas en la figura 9-26.

13. Determine la caída de voltaje entre los extremos de cada resistor mostrado en la figura 9-26 e indique la polaridad real.

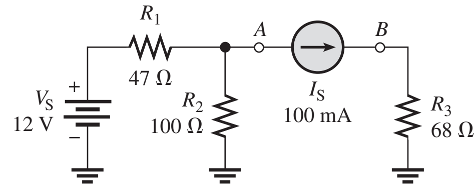


▲ FIGURA 9–26

***14.** Determine la corriente a través de cada resistor mostrado en la figura 9-27.

15. En la figura 9-27, determine el voltaje entre las terminales de la fuente de corriente (puntos *A* y *B*).

▶ FIGURA 9–27



SECCIÓN 9–3 Método de la corriente en lazos

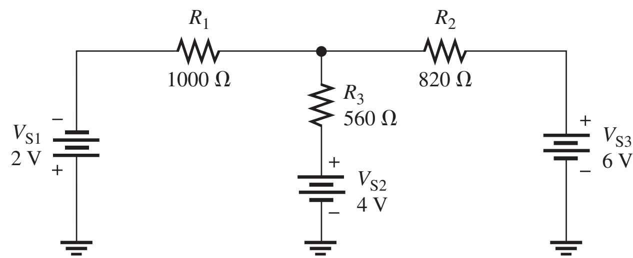
16. Escriba el determinante característico para las ecuaciones:

$$0.045I_A + 0.130I_B + 0.066I_C = 0$$
$$0.177I_A + 0.0420I_B + 0.109I_C = 12$$
$$0.078I_A + 0.196I_B + 0.029I_C = 3.0$$

17. Con el método de la corriente en lazos, determine las corrientes en los lazos que aparecen en la figura 9-28.

18. Determine las corrientes de rama en la figura 9-28.

19. Determine los voltajes y sus polaridades apropiadas en cada uno de los resistores mostrados en la figura 9-28.

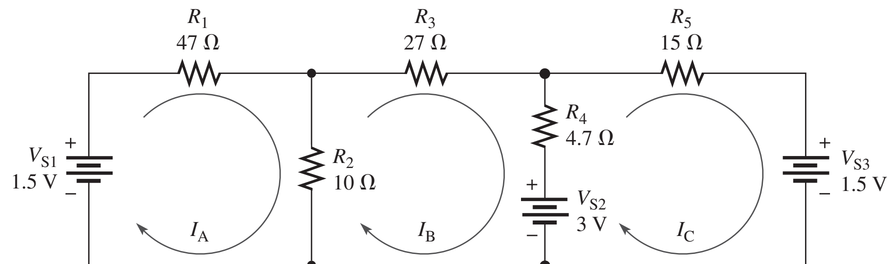


▲ FIGURA 9–28

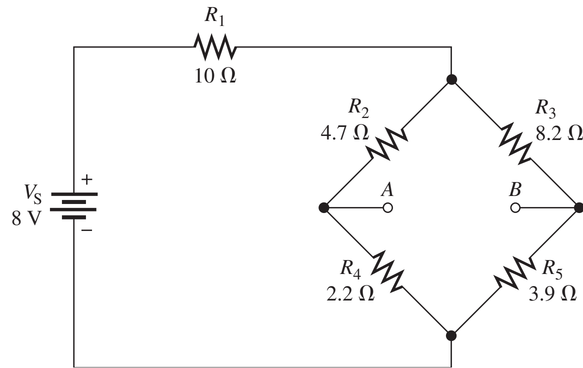
20. Escriba las ecuaciones de lazo para el circuito de la figura 9-29.

21. Resuelva para las corrientes de lazo en la figura 9-29 con su calculadora.

22. Determine la corriente a través de cada resistor en la figura 9-29.



▲ FIGURA 9–29

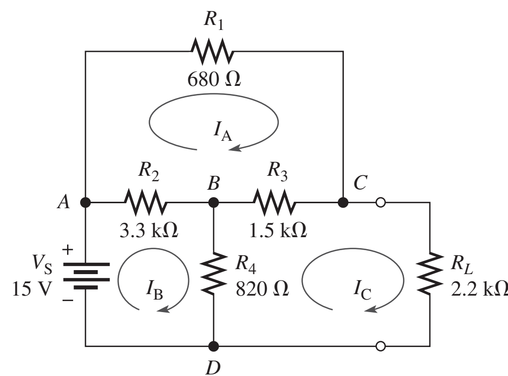


▲ **FIGURA 9–30**

23. Determine el voltaje entre las terminales del puente abierto, *A* y *B*, en la figura 9-30.

24. Cuando se conecta un resistor de 10 kΩ desde la terminal *A* hasta la terminal *B* en la figura 9-30, ¿cuál es la corriente que circula a través de él?

25. Escriba las ecuaciones de lazo en la forma estándar para el circuito puente T mostrado en la figura 9-31.



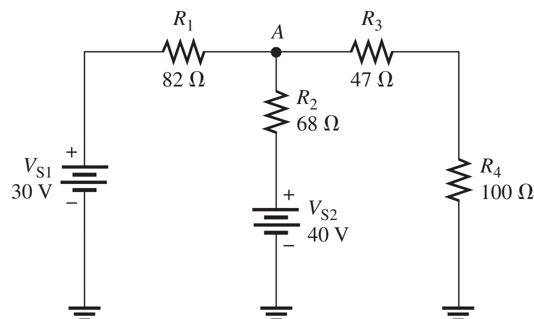
▲ **FIGURA 9–31**

SECCIÓN 9–4 Método del voltaje en nodos

26. En la figura 9-32, use el método del voltaje en nodos para determinar el voltaje presente en el punto *A* con respecto a tierra.

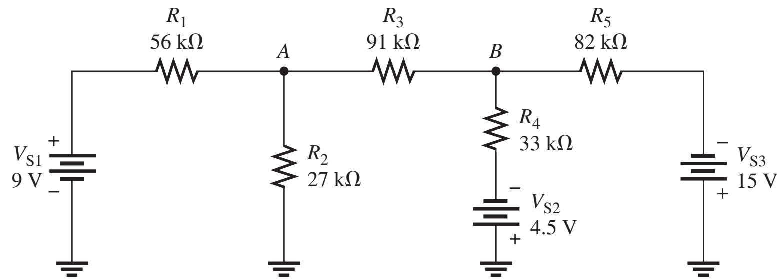
27. ¿Cuáles son los valores de corriente de rama en la figura 9-32? En cada rama, muestre la dirección real de la corriente.

28. Escriba las ecuaciones de voltaje de nodo para la figura 9-29. Use su calculadora para determinar los voltajes de nodo.



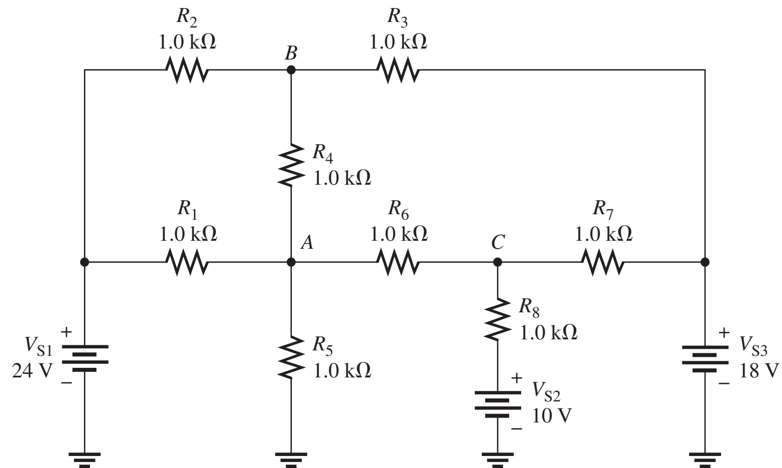
▲ **FIGURA 9–32**

29. Use el análisis de nodos para determinar el voltaje en los puntos *A* y *B* con respecto a tierra en la figura 9-33.



▲ **FIGURA 9–33**

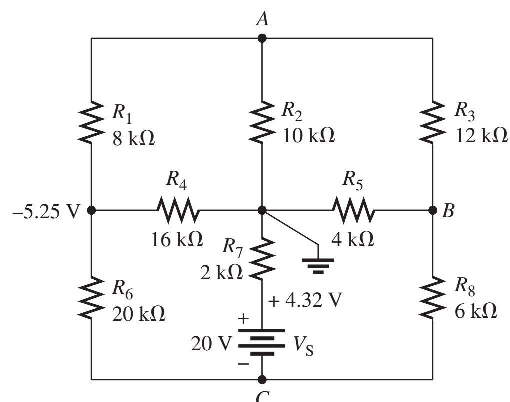
***30.** Determine el voltaje en los puntos *A*, *B* y *C* en la figura 9-34.



▲ **FIGURA 9–34**

***31.** Use el análisis de nodos, el de lazos, o cualquier otro procedimiento para determinar las corrientes y los voltajes en cada nodo desconocido en la figura 9-35.

▶ **FIGURA 9–35**





Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

32. Abra el archivo P09-32 y mida la corriente a través de cada resistor.

33. Abra el archivo P09-33 y mida la corriente a través de cada resistor.

34. Abra el archivo P09-34 y mida los voltajes con respecto a tierra en los nodos A y B.

35. Abra el archivo P09-35. Determine si hay una falla y, si la hay, especifíquela.

36. Abra el archivo P09-36 y mida los voltajes con respecto a tierra en las terminales de salida 1 y 2.

37. Abra el archivo P09-37 y determine la falla.

38. Abra el archivo P09-38 y determine la falla.

39. Abra el archivo P09-39 y determine la falla.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 9–1 Ecuaciones simultáneas en el análisis de circuitos

1. **(a)** 4 **(b)** 0.415 **(c)** −98

2. $\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 4 \end{vmatrix}$

3. $-0.286\text{ A} = -286\text{ mA}$

4. $I_1 = -.038893513289$
$I_2 = .084110232475$
$I_3 = .041925798204$
$I_4 = -.067156192401$

5. $I_1 = -.056363148617$
$I_2 = .07218287729$
$I_3 = .065684612774$
$I_4 = -.041112571034$

SECCIÓN 9–2 Método de la corriente en ramas

1. Se utilizan las leyes de Kirchhoff del voltaje y de la corriente en el método de la corriente en ramas.

2. Falso, pero escriba las ecuaciones de modo que sean compatibles con las direcciones asignadas.

3. Un lazo es una trayectoria cerrada que se ubica en un circuito.

4. Un nodo es una unión de dos o más componentes.

SECCIÓN 9–3 Método de la corriente en lazos

1. No, las corrientes de lazo no necesariamente son las mismas que las corrientes de rama.

2. Un valor negativo indica que la dirección deberá ser invertida.

3. Se utiliza la ley del voltaje de Kirchhoff en el análisis de lazos.

SECCIÓN 9–4 Método del voltaje en nodos

1. La ley de la corriente de Kirchhoff es la base del análisis de nodos.

2. Un nodo de referencia es la unión a la cual se refieren todos los voltajes en el circuito.

Una aplicación de circuito

1. El voltaje de salida no se ve afectado.

2. El voltaje de salida se duplica.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

9–1 $20x_1 - 11x_2 = -15$
$18x_1 + 25x_2 = 10$

9–2 $10V_1 - 21V_2 - 50V_3 = -15$
$18V_1 + 25V_2 - 12V_3 = 10$
$18V_1 - 25V_2 + 12V_3 = 9$

9–3 3.71 A

9–4 −298 mA

9–5 $X_1 = -1.76923076923$; $X_2 = -18.5384615385$; $X_3 = -34.4615384615$

9–6 Mismos resultados que en la respuesta 9-5.

9–7 $I_1 = 17.2$ mA; $I_2 = 8.74$ mA; $I_3 = -8.44$ mA

9–8 $I_1 = X_1 = .013897190675$ (≈13.9 mA); $I_2 = X_2 = -.001867901972$ (≈ −1.87 mA)

9–9 Son correctos.

9–10 $V_1 = 7.68$ V, $V_2 = 8.25$ V, $V_3 = 0.6$ V, $V_4 = 3.73$ V, $V_L = 4.32$ V

9–11 1.92 V

9–12 $I_1 = 18.8$ mA, $I_2 = 19.3$ mA, $I_3 = 16.2$ mA, $I_4 = 15.8$ mA, $I_L = 0.39$ mA

9–13 $V_B = 4.04$ V

AUTOEVALUACIÓN

1. (e) **2.** (d) **3.** (b) **4.** (c) **5.** (c)
6. (b) **7.** (d) **8.** (a) **9.** (e) **10.** (b)

EXAMEN RÁPIDO

1. (a) **2.** (b) **3.** (a) **4.** (a) **5.** (c) **6.** (b)
7. (a) **8.** (a) **9.** (c) **10.** (b) **11.** (b) **12.** (b)

10 MAGNETISMO Y ELECTROMAGNETISMO

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Explicar los principios de un campo magnético
- Explicar los principios del electromagnetismo
- Describir el principio de operación de varios tipos de dispositivos electromagnéticos
- Explicar la histéresis magnética
- Analizar el principio de inducción electromagnética
- Describir algunas aplicaciones de la inducción electromagnética

TÉRMINOS CLAVE

- Altavoz
- Ampere-vuelta (At, por sus siglas en inglés)
- Campo electromagnético
- Campo magnético
- Corriente inducida (i_{ind})
- Electromagnetismo
- Flujo magnético
- Fuerza magnetomotriz (fmm)
- Histéresis
- Inducción electromagnética
- Ley de Faraday
- Ley de Lenz
- Líneas de fuerza
- Permeabilidad
- Relevador
- Reluctancia
- Retentividad
- Solenoide
- Tesla
- Voltaje inducido (v_{ind})
- Weber (Wb)

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En aplicación de un circuito, usted aprenderá cómo se utilizan los relevadores electromagnéticos en sistemas de alarma contra robo, y desarrollará un procedimiento para revisar un sistema de alarma básico.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

Este capítulo se aparta de la cobertura de circuitos de cd e introduce los conceptos de magnetismo y electromagnetismo. La operación de dispositivos tales como el relevador, el solenoide, y el altavoz está basada en parte en principios magnéticos o electromagnéticos. La inducción electromagnética es importante en un componente eléctrico llamado inductor o bobina, lo cual es el tema del capítulo 13.

Dos tipos de imanes son el imán permanente y el electroimán. El imán permanente mantiene un campo magnético constante entre sus dos polos sin que intervenga alguna excitación externa. El electroimán produce un campo magnético sólo cuando circula corriente a través de él. El electroimán es básicamente una bobina de alambre arrollado alrededor de un material de núcleo magnético.

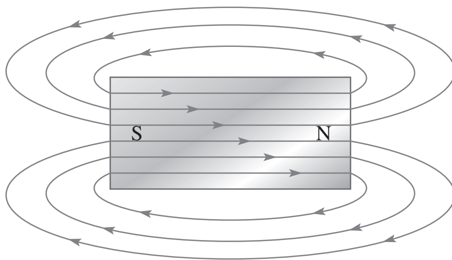
10–1 EL CAMPO MAGNÉTICO

Un imán permanente tiene un campo magnético alrededor de él. El campo magnético consiste en líneas de fuerza que se irradian desde el polo norte (N) hasta el polo sur (S) y de regreso al polo norte a través del material magnético.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar los principios de un campo magnético**
  - Definir el término *flujo magnético*
  - Definir el término *densidad de flujo magnético*
  - Analizar cómo se magnetizan los materiales
  - Explicar cómo funciona un interruptor magnético

Un imán permanente, tal como la barra magnética mostrada en la figura 10-1, tiene un campo magnético a su alrededor que consiste en líneas de fuerza, o líneas de flujo. Por claridad, sólo una cuantas líneas de fuerza se muestran en la figura. Imaginemos, sin embargo, que muchas líneas circundan el imán en tres dimensiones. Las líneas se contraen al tamaño más pequeño posible y se mezclan entre sí, aunque no se tocan. De esta manera se forma efectivamente un campo magnético continuo alrededor del imán.



Las líneas con flecha representan sólo algunas de las muchas líneas de fuerza magnética que hay en el campo magnético.

◀ **FIGURA 10–1**

Líneas de fuerza magnética alrededor de una barra imantada.

BIOGRAFÍA



Wilhelm Eduard Weber 1804–1891

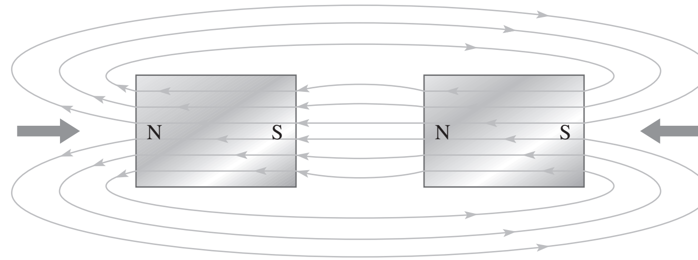
Weber fue un físico alemán que trabajó codo a codo con Gauss, cuya biografía aparece más adelante. De forma independiente, Weber estableció un sistema de unidades eléctricas absolutas y realizó trabajos que resultaron cruciales para desarrollos posteriores de la teoría electromagnética de la luz. La unidad de flujo magnético fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Cortesía de Smithsonian Institution. Fotografía núm. 52,604).

Cuando los polos desiguales de dos imanes permanentes se colocan muy cerca unos de otros, sus campos magnéticos producen una fuerza de atracción, como indica la figura 10-2(a). Cuando dos polos iguales se acercan entre sí, se repelen, según muestra la parte (b).

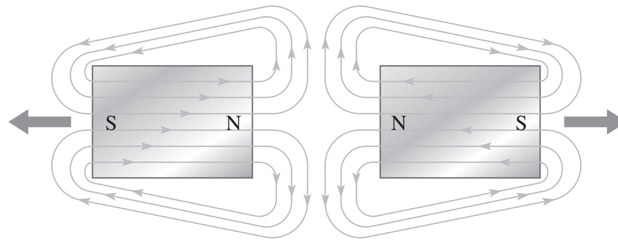
Cuando un material no magnético tal como papel, vidrio, madera o plástico se coloca en un campo magnético, las líneas de fuerza no se alteran, según muestra la figura 10-3(a). No obstante, cuando un material magnético tal como hierro se coloca en el campo magnético, las líneas de fuerza tienden a cambiar de curso y atraviesan el hierro en lugar de pasar a través del aire circundante. Lo hacen así porque el hierro proporciona una trayectoria magnética más fácil de establecer que la del aire. La figura 10-3(b) ilustra este principio. El hecho de que las líneas de fuerza magnéticas sigan una trayectoria a través del hierro u otros materiales es una consideración primordial en el proceso de diseño de escudos o pantallas que impiden a los campos magnéticos parásitos afectar circuitos sensibles.

Flujo magnético (ϕ)

El grupo de líneas de fuerza que van del polo norte al polo sur de un imán se llama **flujo magnético**, simbolizado mediante ϕ (la letra griega fi). El número de líneas de fuerza presentes en un campo magnético determina el valor del flujo. Mientras más líneas de fuerza haya, más grande es el flujo y más intenso el campo magnético.



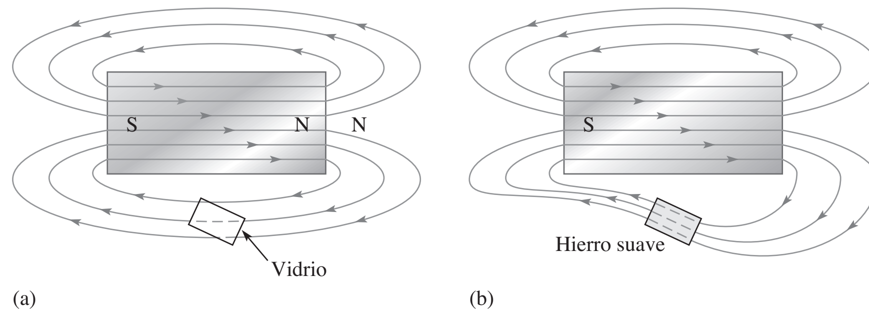
(a) Los polos desiguales se atraen



(b) Los polos iguales se repelen

▲ **FIGURA 10–2**

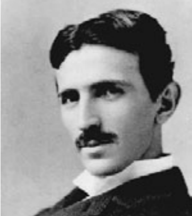
Atracción y repulsión magnéticas.



▲ **FIGURA 10–3**

Efecto de (a) materiales no magnéticos y (b) materiales magnéticos en un campo magnético.

BIOGRAFÍA



Nikola Tesla 1856–1943

Tesla nació en Croacia (entonces Austria-Hungría). Fue ingeniero eléctrico e inventó el motor de inducción de ca, los sistemas de ca polifásicos, el transformador de bobina Tesla, las comunicaciones inalámbricas, y las luces fluorescentes. Trabajó para Edison cuando llegó por primera vez a Estados Unidos, en 1884, y después para Westinghouse. La unidad SI de densidad de flujo magnético fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Cortesía del Museo Nikola Tesla, Belgrado, Yugoslavia).

La unidad de flujo magnético es el **weber (Wb)**. Un weber es igual a 10^8 líneas. El weber es una unidad muy grande; por tanto, en la mayoría de las situaciones prácticas, se utiliza el microweber (μWb). Un microweber es igual a 100 líneas de flujo magnético.

Densidad de flujo magnético (*B*)

La **densidad de flujo magnético** es la cantidad de flujo por unidad de área perpendicular al campo magnético. Se simboliza mediante B, y su unidad SI es el **tesla (T)**. Un tesla es igual a un weber por metro cuadrado (Wb/m^2). La fórmula siguiente expresa la densidad de flujo:

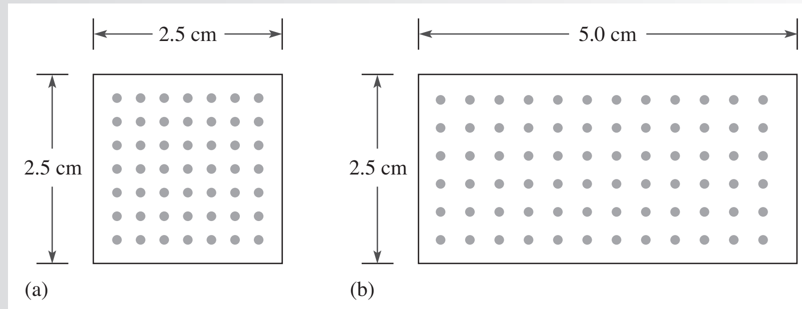
Ecuación 10–1

$$B = \frac{\phi}{A}$$

donde ϕ es el flujo (Wb) y A es el área de sección transversal en metros cuadrados (m^2) del campo magnético.

EJEMPLO 10–1 Compare el flujo y la densidad de flujo en los dos núcleos magnéticos mostrados en la figura 10-4. El diagrama representa la sección transversal de un material magnetizado. Suponga que cada punto equivale a 100 líneas o 1 μWb.

▶ **FIGURA 10–4**



Solución El flujo es simplemente el número de líneas. En la figura 10-4(a) hay 49 puntos. Cada punto representa 1 μWb, así que el flujo es de 49 μWb. En la figura 10-4(b) hay 72 puntos, entonces el flujo es de 72 μWb.

Para calcular la densidad de flujo en la figura 10-4(a), primero encuentre el área en metros cuadrados.

$$A = l \times w = 0.025\text{ m} \times 0.025\text{ m} = 6.25 \times 10^{-4}\text{ m}^2$$

En la figura 10-4(b) el área es

$$A = l \times w = 0.025\text{ m} \times 0.050\text{ m} = 1.25 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

Use la ecuación 10-1 para calcular la densidad de flujo. En la figura 10-4(a) la densidad de flujo es

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{49\ \mu\text{Wb}}{6.25 \times 10^{-4}\text{ m}^2} = 78.4 \times 10^{-3}\text{ Wb/m}^2 = 78.4 \times 10^{-3}\text{ T}$$

En la figura 10-4(b) la densidad de flujo es

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{72\ \mu\text{Wb}}{1.25 \times 10^{-3}\text{ m}^2} = 57.6 \times 10^{-3}\text{ Wb/m}^2 = 57.6 \times 10^{-3}\text{ T}$$

Los datos que aparecen en la tabla 10-1 comparan los dos núcleos. Observe que el núcleo con el flujo más grande no necesariamente tiene la densidad de flujo más alta.

▶ **TABLA 10–1**

	FLUJO (Wb)	ÁREA (m^2)	DENSIDAD DE FLUJO (T)
Figura 10–4(a)	49 μWb	$6.25 \times 10^{-4}\text{ m}^2$	78.4×10^{-3} T
Figura 10–4(b)	72 μWb	$1.25 \times 10^{-3}\text{ m}^2$	57.6×10^{-3} T

Problema relacionado* ¿Qué le sucede a la densidad de flujo si el flujo mostrado en la figura 10-4(a) está en un núcleo de 5.0 cm × 5.0 cm?

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 10–2 Si la densidad de flujo en cierto material magnético es de 0.23 T y el área del material es de 0.38 pulg^2, ¿cuál es el flujo a través del material?

Solución Primero, 0.38 pulg^2 se convierten a metros cuadrados. 39.37 pulg = 1 m; por consiguiente,

$$A = 0.38\text{ pulg}^2[1\text{ m}^2/(39.37\text{ pulg})^2] = 245 \times 10^{-6}\text{ m}^2$$

El flujo a través del material es

$$\phi = BA = (0.23\ \text{T})(245 \times 10^{-6}\ \text{m}^2) = \mathbf{56.4\ \mu Wb}$$

Problema relacionado Calcule B si $A = 0.05$ pulg^2 y $\phi = 1000\ \mu$Wb.

El Gauss Aunque el Tesla (T) es la unidad en el SI de densidad de flujo, de vez en cuando se utiliza otra unidad llamada **gauss** del sistema CGS (centímetro-gramo-segundo), donde (10^4 gauss = 1 T). De hecho, el instrumento utilizado para medir la densidad de flujo es el gaussímetro. El gauss es una unidad conveniente para emplear en campos magnéticos pequeños tales como el campo magnético terrestre, el cual oscila entre 0.3 y 0.6 gauss, según el lugar.

BIOGRAFÍA



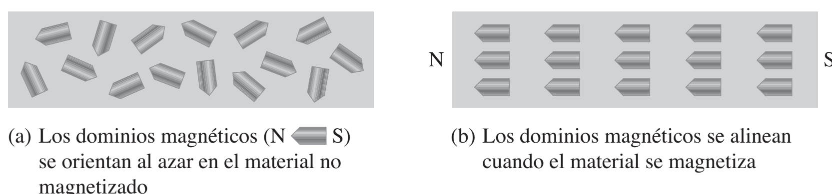
Karl Friedrich Gauss
1777–1855

Gauss, un matemático alemán, desaprobó muchas teorías matemáticas del siglo XVIII. Más tarde, trabajó en estrecha colaboración con Weber en un sistema mundial de estaciones para realizar observaciones sistemáticas del magnetismo terrestre. El resultado más importante de su trabajo en electromagnetismo fue el desarrollo posterior del telégrafo realizado por otros estudiosos basado en los resultados obtenidos por él. La unidad CGS de densidad de flujo magnético fue nombrada en su honor. (Crédito: Ilustración de Steven S. Nau).

Cómo se magnetizan los materiales

Los materiales ferromagnéticos tales como hierro, níquel y cobalto se magnetizan al colocarlos en el campo magnético de un imán. Todos hemos visto que un imán permanente atrae cosas como sujetapapeles, clavos y limaduras de hierro. En estos casos, el objeto se magnetiza (es decir, en realidad se convierte en un imán) debido a la influencia del campo magnético permanente y es atraído por el imán. Cuando se retira el campo magnético, el objeto tiende a perder su magnetismo.

Los materiales ferromagnéticos provocan que se creen dominios magnéticos diminutos dentro de su estructura atómica. Estos dominios pueden ser considerados como pequeñísimas barras imantadas con polos norte y sur. Cuando el material no está expuesto a un campo magnético externo, los dominios magnéticos se orientan al azar, como indica la figura 10-5(a). Cuando el material se coloca en un campo magnético, los dominios se alinean según muestra la parte (b). Por tanto, el objeto se convierte efectivamente en un imán.



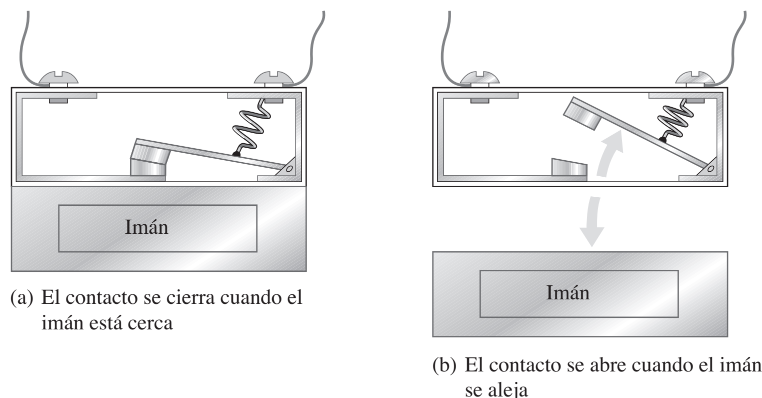
(a) Los dominios magnéticos (N ◀ S) se orientan al azar en el material no magnetizado

(b) Los dominios magnéticos se alinean cuando el material se magnetiza

▲ **FIGURA 10–5**

Dominios magnéticos en (a) un material no magnetizado y (b) un material magnetizado.

Aplicaciones Los imanes permanentes se utilizan en interruptores, tales como el interruptor magnético normalmente cerrado (NC). Cuando un imán se acerca a un mecanismo interruptor



(a) El contacto se cierra cuando el imán está cerca

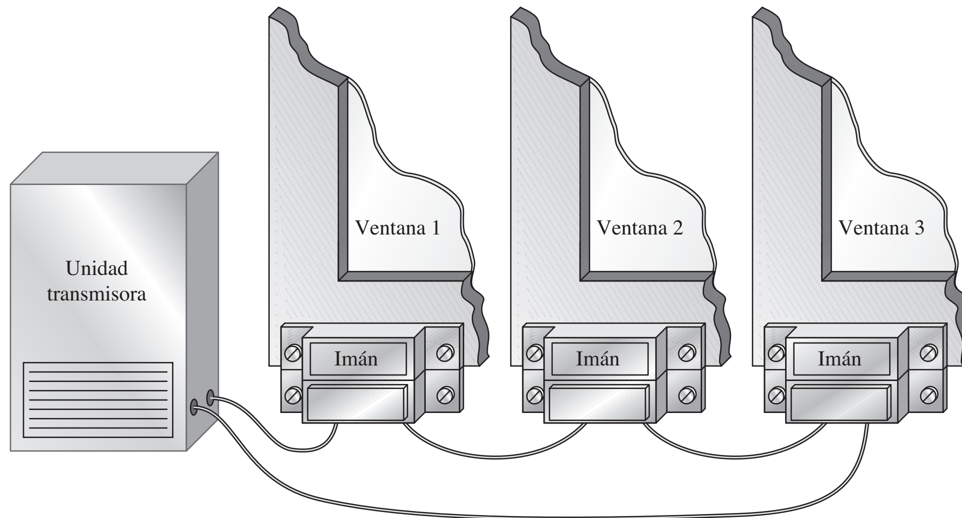
(b) El contacto se abre cuando el imán se aleja

▶ **FIGURA 10–6**

Operación de un interruptor magnético.

como indica la figura 10-6(a), el brazo metálico se mantiene en su posición NC. Cuando el imán se aleja, el resorte jala el brazo hacia arriba, lo cual rompe el contacto, según muestra la parte (b).

Los interruptores de este tipo son de uso común en sistemas de alarma perimetrales para detectar la irrupción a un edificio a través de ventanas o puertas. Como se muestra en la figura 10-7, varias aberturas pueden estar protegidas por interruptores magnéticos conectados a un transmisor común. Cuando cualquier interruptor se abre, el transmisor se activa y envía una señal a un receptor central y unidad de alarma.



◀ **FIGURA 10–7**

Conexión de un sistema de alarma perimetral típico.

REPASO DE LA SECCIÓN 10-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Cuando los polos norte de dos imanes se colocan cercanos entre sí, ¿se repelen o atraen uno al otro?
2. ¿Qué es el flujo magnético?
3. ¿Cuál es la densidad de flujo cuando $\phi = 4.5\ \mu\text{Wb}$ y $A = 5 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$?

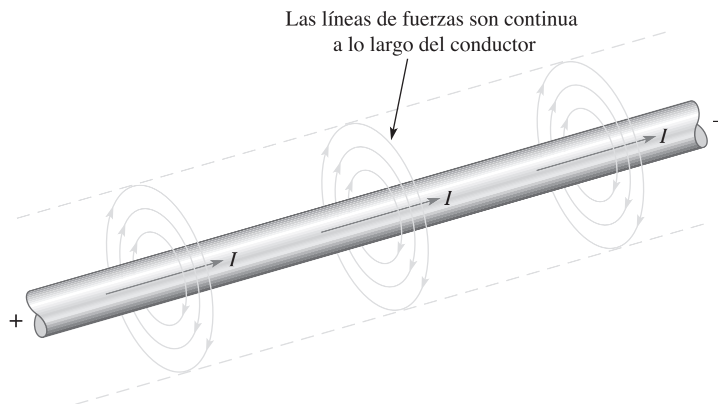
10–2 ELECTROMAGNETISMO

El **electromagnetismo** es la producción de un campo magnético por una corriente en un conductor.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar los principios del electromagnetismo**
  - Determinar la dirección de las líneas de fuerza magnéticas
  - Definir el término *permeabilidad*
  - Definir el término *reluctancia*
  - Definir el término *fuerza magnetomotriz*
  - Describir un electroimán básico

La corriente produce un campo magnético, llamado campo electromagnético, alrededor de un conductor, como ilustra la figura 10-8. Las líneas de fuerza invisibles del campo magnético forman un patrón circular concéntrico alrededor del conductor y son continuas a todo lo largo de éste. A diferencia de la barra imantada, el campo magnético que rodea un conductor no tiene polos

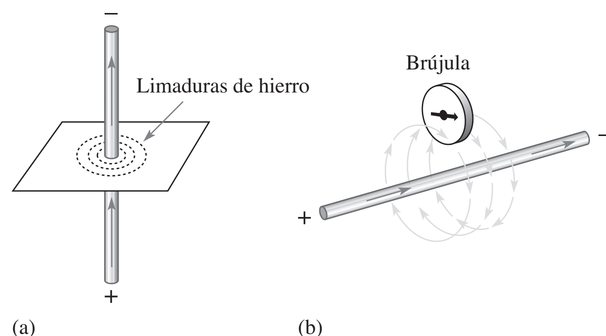


▶ **FIGURA 10–8**

Campo magnético alrededor de un conductor que transporta corriente. Las flechas rojas indican la dirección convencional de la corriente (+ a −).

norte o sur. La dirección de las líneas de fuerza que rodean el conductor mostrado en la figura es para corriente convencional. Las líneas están en el mismo sentido que las manecillas del reloj. Cuando se invierte la corriente, las líneas del campo magnético van en dirección contraria a la de las manecillas del reloj.

Aunque el campo magnético no es visible, tiene capacidad para producir efectos visibles. Por ejemplo, al insertar perpendicularmente en una hoja de papel un conductor que transporta corriente, limaduras de hierro colocadas en la superficie del papel se acomodan en líneas de fuerza magnéticas formando anillos concéntricos, como ilustra la figura 10-9(a). La parte (b) de la figura muestra que el polo norte de una brújula colocada en el campo electromagnético apuntará en la dirección de las líneas de fuerza. El campo es más intenso cerca del conductor y se debilita al alejarse de éste.



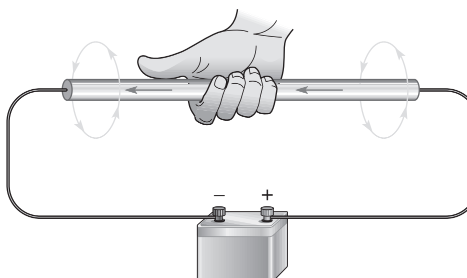
▶ **FIGURA 10–9**

Efectos visibles de un campo electromagnético.

Regla de la mano derecha En la figura 10-10 se ilustra una ayuda para recordar la dirección de las líneas de fuerza. Imagine que usted está sujetando el conductor con su mano derecha, con

▶ **FIGURA 10–10**

Ilustración de la regla de la mano derecha. La cual se utiliza para corriente convencional (+ a −).



el pulgar apuntando en la dirección de la corriente; así, sus dedos apuntarán en la dirección de las líneas de fuerza magnéticas.

Propiedades electromagnéticas

Varias propiedades importantes están relacionadas con campos magnéticos.

Permeabilidad (μ) La facilidad con que un campo magnético puede ser establecido en un material dado se mide mediante la permeabilidad de dicho material. Mientras más alta es la permeabilidad, más fácilmente se puede establecer el campo magnético.

El símbolo de permeabilidad es μ (la letra griega mu), y su valor varía según el tipo de material. La permeabilidad de un vacío (μ_0) es de $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/At · m (webers/ampere-vuelta · metro) (en este texto, At simboliza ampere-vuelta) y se utiliza como referencia. Los materiales ferromagnéticos tienen permeabilidades características que son cientos de veces más grandes que la permeabilidad del aire (vacío), por lo que un campo magnético puede ser establecido con relativa facilidad en estos materiales. Los materiales ferromagnéticos incluyen hierro, acero, níquel, cobalto, y sus aleaciones.

La *permeabilidad relativa* (μ_r) de un material es la relación de su permeabilidad absoluta a la permeabilidad del aire (vacío).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Ecuación 10–2

Como ésta es una relación de permeabilidades, μ_r no tiene dimensiones. La permeabilidad relativa de algunos materiales magnéticos típicos, tal como el hierro, es de unos cientos. La permeabilidad relativa de materiales altamente permeables puede ser hasta de 100,000.

***Reluctancia* ($\mathcal{R}$)** La oposición al establecimiento de un campo magnético en un material se llama **reluctancia**. El valor de reluctancia es directamente proporcional a la longitud (l) de la trayectoria magnética e inversamente proporcional a la permeabilidad (μ) y al área de sección transversal (A) del material, como lo expresa la siguiente ecuación:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}$$

Ecuación 10–3

En circuitos magnéticos, la reluctancia es análoga a la resistencia que tiene lugar en los circuitos eléctricos. La unidad de reluctancia se deriva con l en metros, A (área) en metros cuadrados, y μ en Wb/At · m como sigue:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{\cancel{\text{m}}}{(\text{Wb/At}\cdot\cancel{\text{m}})(\cancel{\text{m}^2})} = \frac{\text{At}}{\text{Wb}}$$

At/Wb es ampere-vueltas/weber.

La ecuación 10-3 es similar a la ecuación 2-6 empleada para determinar la resistencia de un conductor. Recuerde que la ecuación 2-6 es

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

El recíproco de la resistividad (ρ) es la conductividad (σ). Sustituyendo ρ por $1/\sigma$, la ecuación 2-6 se escribe como

$$R = \frac{l}{\sigma A}$$

Compare esta última ecuación para la resistencia de un conductor con la ecuación 10-3. El significado de la longitud (l) y del área (A) es el mismo en ambas ecuaciones. La conductividad (σ) en circuitos eléctricos es análoga a la permeabilidad (μ) en circuitos magnéticos. Asimismo, la resistencia (R) en circuitos eléctricos es análoga a la reluctancia ($\mathcal{R}$) en circuitos magnéticos; ambas son oposiciones. Típicamente, la reluctancia de un circuito magnético es de 50,000 At/Wb o más, según el tamaño y tipo de material.

EJEMPLO 10–3 Calcule la reluctancia de un toro (un núcleo en forma de dona) fabricado en acero al bajo carbono. El radio interior del toro es de 1.75 cm y el radio externo mide 2.25 cm. Suponga que la permeabilidad del acero al bajo carbono es de 2×10^{-4} Wb/At · m.

Solución Antes de que calcule el área y la longitud debe convertir los centímetros en metros. Por las dimensiones dadas, el espesor (diámetro) es de 0.5 cm = 0.005 m. Por tanto, el área de sección transversal es

$$A = \pi r^2 = \pi(0.0025)^2 = 1.96 \times 10^{-5}\ \text{m}^2$$

La longitud es igual a la circunferencia del toro calculada con el radio promedio de 2.0 cm o 0.020 m.

$$l = C = 2\pi r = 2\pi(0.020\ \text{m}) = 0.125\ \text{m}$$

Al sustituir valores en la ecuación 10-3,

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.125\ \text{m}}{(2 \times 10^{-4}\ \text{Wb/At} \cdot \text{m})(1.96 \times 10^{-5}\ \text{m}^2)} = \mathbf{31.9 \times 10^6\ At/Wb}$$

Problema relacionado ¿Qué le sucede a la reluctancia si el núcleo de hierro fundido se sustituye por uno de acero fundido con permeabilidad de 5×10^{-4} Wb/At·m?

EJEMPLO 10–4 La permeabilidad relativa del acero suave es de 800. Calcule la reluctancia de un núcleo de acero suave de 10 cm de longitud y 1.0 cm × 1.2 cm de sección transversal.

Solución Primero, determine la permeabilidad del acero suave.

$$\mu = \mu_0\mu_r = (4\pi \times 10^{-7}\ \text{Wb/At} \cdot \text{m})(800) = 1.00 \times 10^{-3}\ \text{Wb/At} \cdot \text{m}$$

A continuación, cambie la longitud a metros y el área a metros cuadrados.

$$l = 10\ \text{cm} = 0.10\ \text{m}$$

$$A = 0.010\ \text{m} \times 0.012\ \text{m} = 1.2 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

Al sustituir valores en la ecuación 10-3,

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.10\ \text{m}}{(1.00 \times 10^{-3}\ \text{Wb/At} \cdot \text{m})(1.2 \times 10^{-4}\ \text{m}^2)} = \mathbf{8.33 \times 10^5\ At/Wb}$$

Problema relacionado ¿Qué le sucede a la reluctancia si el núcleo es Permalloy 78 con permeabilidad relativa de 4000?

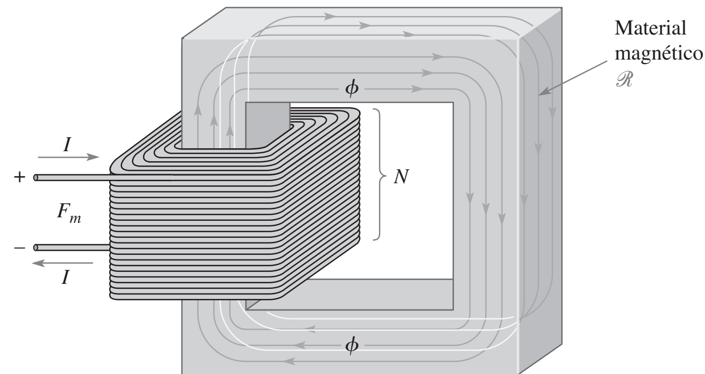
Fuerza magnetomotriz (fmm) Como ya se vio, la corriente que circula en un conductor produce un campo magnético. La causa de un campo magnético se llama **fuerza magnetomotriz (fmm)**. El nombre fuerza magnetomotriz tiene algo de erróneo porque, en sentido físico, en realidad no es una fuerza sino el resultado directo del movimiento de una carga (corriente). La unidad de fmm, el ampere-vuelta (At, por sus siglas en inglés), se estableció sobre la base de la corriente presente en una sola espira (vuelta) de conductor. La fórmula de la fmm es

Ecuación 10–4

$$F_m = NI$$

donde F_m es la fuerza magnetomotriz, N es el número de vueltas de conductor, e I es la corriente en amperes.

La figura 10-11 ilustra que el número de vueltas de un conductor que transporta corriente alrededor de un material magnético crea una fuerza que establece líneas de flujo a través de la tra-



◀ **FIGURA 10–11**

Circuito magnético básico.

yectoria magnética. La cantidad de flujo depende de la magnitud de la fmm y de la reluctancia del material, conforme a lo expresado por la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{F_m}{\mathscr{R}}$$

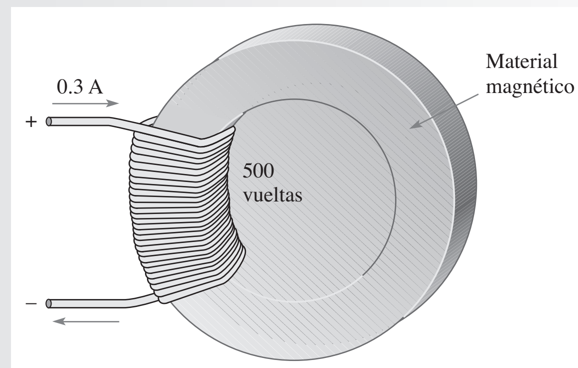
Ecuación 10–5

La ecuación 10-5 se conoce como la *ley de Ohm para circuitos magnéticos* porque el flujo (ϕ) es análogo a la corriente, la fmm (F_m) es análoga al voltaje, y la reluctancia ($\mathscr{R}$) es análoga a la resistencia.

EJEMPLO 10–5

¿Cuánto flujo se establece en la trayectoria magnética de la figura 10-12 si la reluctancia del material es de 2.8×10^5 At/Wb?

▶ **FIGURA 10–12**



Solución

$$\phi = \frac{F_m}{\mathscr{R}} = \frac{NI}{\mathscr{R}} = \frac{(500\text{ t})(0.300\text{ A})}{2.8 \times 10^5\text{ At/Wb}} = \mathbf{536\ \mu Wb}$$

Problema relacionado ¿Cuánto flujo se establece en la trayectoria magnética de la figura 10-12 si la reluctancia es de 7.5×10^3 At/Wb, el número de vueltas es de 300, y la corriente es de 0.18 A?

EJEMPLO 10–6

A través de una bobina de 400 vueltas circula una corriente de 0.1 A.

(a) ¿Cuál es la fmm?

(b) ¿Cuál es la reluctancia del circuito si el flujo es de 250 μWb?

Solución **(a)** $N = 400$ y $I = 0.1$ A

$F_m = NI = (400\text{ t})(0.1\text{ A}) = \mathbf{40\ At}$

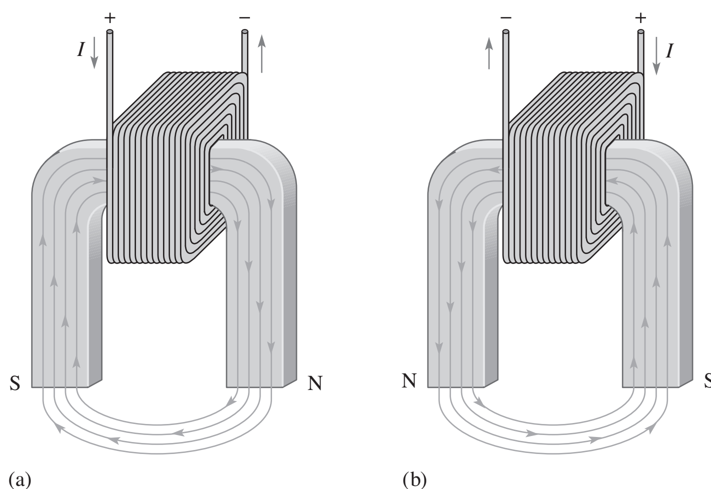
(b) $$\mathcal{R} = \frac{F_m}{\phi} = \frac{40\text{ At}}{250\ \mu\text{Wb}} = \mathbf{1.60 \times 10^5\ At/Wb}$$

Problema relacionado Resuelva otra vez el ejemplo con $I = 85$ mA y $N = 500$. El flujo es de 500 μWb.

El electroimán

Un electroimán está basado en las propiedades que se acaban de aprender. Un electroimán básico es simplemente una bobina de hilo arrollado alrededor de un núcleo que es fácil de magnetizar.

La forma de un electroimán puede ser diseñada de acuerdo con diversas aplicaciones. Por ejemplo, la figura 10-13 muestra un núcleo magnético en forma de U. Cuando la bobina de hilo se conecta a una batería y hay corriente, parte (a), se establece un campo magnético como se indica. Si se invierte la corriente, parte (b), la dirección del campo magnético también se invierte. Mientras más se acercan entre sí los polos norte y sur, más pequeña se vuelve la separación entre ellos, y es más fácil establecer un campo magnético porque la reluctancia se redujo.



▲ **FIGURA 10–13**

La inversión de la corriente en la bobina causa que el campo electromagnético se invierta.

REPASO DE LA SECCIÓN 10-2

1. Explique la diferencia entre magnetismo y electromagnetismo.
2. ¿Qué le pasa al campo magnético en un electroimán cuando la corriente que circula a través de la bobina se invierte?
3. Enuncie la ley de Ohm para un circuito magnético.
4. Compare cada cantidad en la pregunta 3 con su contraparte eléctrica.

10–3 DISPOSITIVOS ELECTROMAGNÉTICOS

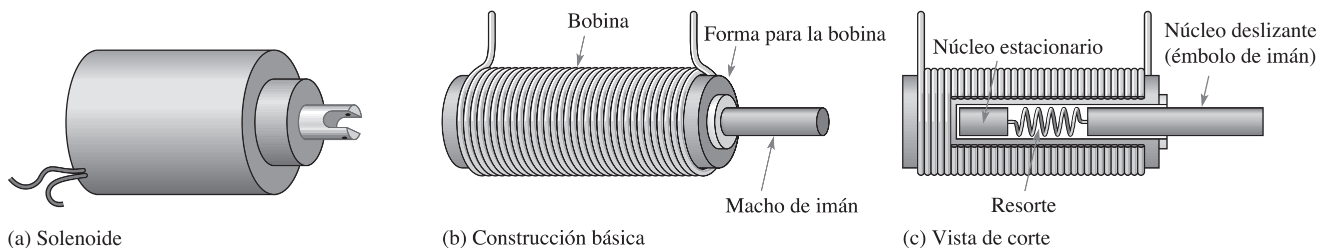
Muchos tipos de dispositivos útiles, tales como grabadoras de cinta, motores eléctricos, altavoces, solenoides y relevadores, están basados en el electromagnetismo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir el principio operativo de varios tipos de dispositivos electromagnéticos**
  - Analizar cómo funciona un solenoide y una válvula solenoide
  - Analizar cómo funciona un relevador
  - Analizar cómo funciona un altavoz
  - Analizar el movimiento de un medidor analógico básico
  - Explicar en qué consiste un disco magnético y la operación de lectura y escritura en cinta
  - Explicar el concepto del disco magneto-óptico

El solenoide

El **solenoide** es un tipo de dispositivo electromagnético provisto de un núcleo de hierro móvil llamado *émbolo*. El movimiento de este núcleo de hierro depende tanto del campo electromagnético como de la fuerza mecánica de un resorte. En la figura 10-14 se muestra la estructura básica de un solenoide. Consiste en una bobina cilíndrica de hilo arrollado alrededor de una forma hueca no magnética. Un núcleo de hierro estacionario está fijo en el extremo de la flecha y un núcleo de hierro deslizante (émbolo) está unido al núcleo estacionario por medio de un resorte.

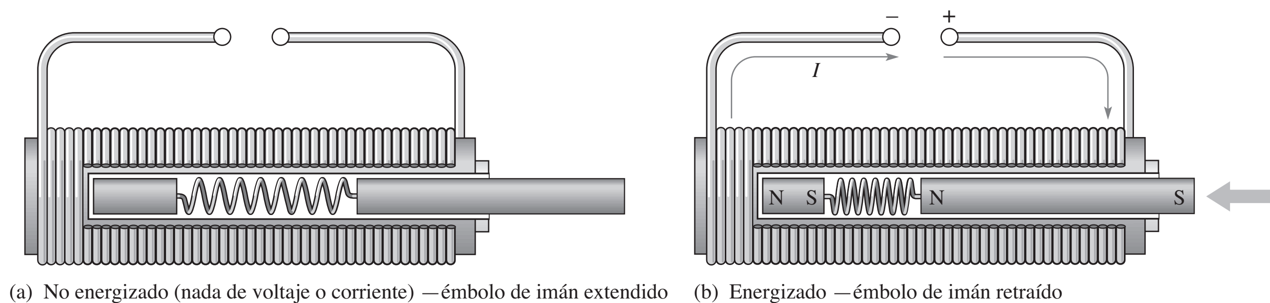


▲ FIGURA 10–14

Estructura básica de un solenoide.

La operación de un solenoide se ilustra en la figura 10-15 en las condiciones no energizada y energizada. En el estado de reposo (o no energizado), el émbolo se extiende. El solenoide es energizado por una corriente que recorre la bobina, la cual establece un campo electromagnético que magnetiza ambos núcleos de hierro. El polo sur del núcleo estacionario atrae al polo norte del núcleo móvil y causa que se deslice hacia dentro, con lo cual se retrae el émbolo y comprime al resorte. En tanto exista corriente en la bobina, el émbolo permanece retraído por la fuerza de atracción de los campos magnéticos. Cuando la corriente se interrumpe, los campos magnéticos colapsan y la fuerza del resorte comprimido empuja el émbolo hacia atrás. El solenoide se utiliza en aplicaciones tales como apertura y cierre de válvulas y cerraduras de puertas de automóvil.

La válvula solenoide En controles industriales, las **válvulas solenoide** son ampliamente utilizadas para controlar el flujo de aire, agua, vapor, aceites, refrigerantes, y otros fluidos. Se utilizan válvulas solenoide en sistemas tanto neumáticos (aire) como hidráulicos (aceite), que son comunes en controles de máquinas. Las válvulas solenoide también son comunes en los campos aeroespacial y médico. Estas válvulas pueden mover un émbolo, abrir o cerrar un orificio o hacer girar una cantidad fija una válvula de charnela.



(a) No energizado (nada de voltaje o corriente) —émbolo de imán extendido (b) Energizado —émbolo de imán retraído

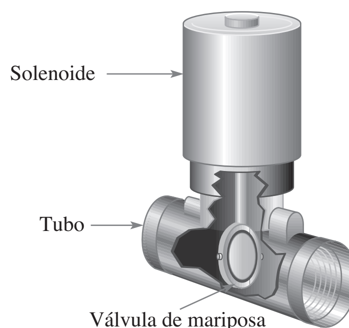
▲ **FIGURA 10–15**

Operación básica de un solenoide.

Una válvula solenoide consta de dos unidades funcionales; una bobina solenoide generadora del campo magnético que produce el movimiento requerido para abrir o cerrar la válvula y un cuerpo de válvula, el cual está aislado del ensamble de la bobina por medio de un sello a prueba de filtraciones e incluye un tubo y una válvula de mariposa. La figura 10-16 muestra una vista de corte de un tipo de válvula solenoide. Cuando el solenoide es energizado, la válvula de mariposa gira para abrir una válvula normalmente cerrada (NC) o para cerrar una válvula normalmente abierta (NA).

▶ **FIGURA 10–16**

Estructura básica de una válvula solenoide.

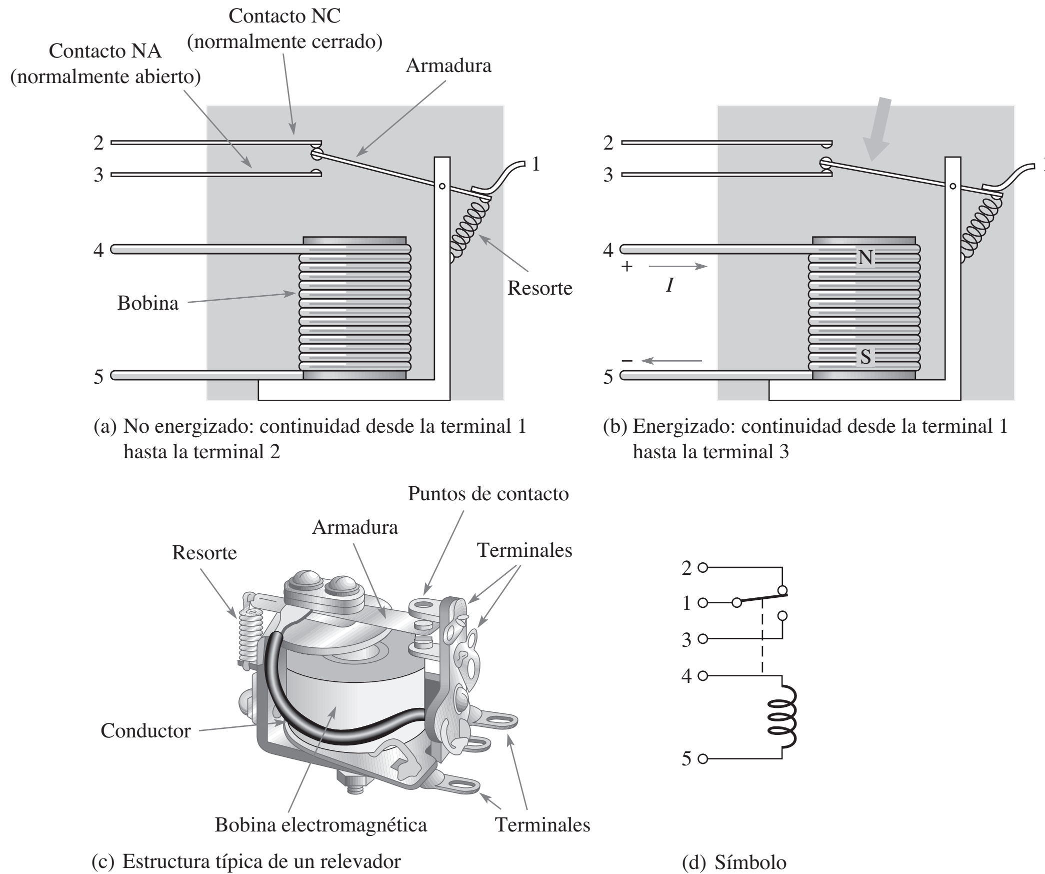


Están disponibles válvulas solenoide con una amplia variedad de configuraciones incluidas las válvulas normalmente abiertas o normalmente cerradas. Están clasificadas para diferentes tipos de fluidos (por ejemplo, gas o agua), presiones, número de trayectorias, tamaños, y más usos. La misma válvula puede controlar más de una línea y mover más de un solenoide.

El relevador

El **relevador** difiere del solenoide en que la acción electromagnética se utiliza para abrir o cerrar contactos eléctricos y no para producir movimiento mecánico. La figura 10-17 muestra la operación básica de un *relevador tipo armadura* con un contacto normalmente abierto (NA) y otro normalmente cerrado (NC) (unipolar-doble vía). Cuando no hay corriente en la bobina, la armadura se mantiene contra el contacto superior por la acción del resorte, con lo cual se produce continuidad desde la terminal 1 hasta la terminal 2, como indica la parte (a) de la figura. Cuando la armadura es energizada por la corriente de la bobina, la fuerza de atracción del campo electromagnético la jala hacia abajo y establece la conexión con el contacto inferior para producir continuidad desde la terminal 1 hasta la terminal 3, según muestra la figura 10-17(b). La parte (c) ilustra un relevador de armadura típico y la parte (d) muestra el símbolo esquemático.

Otro tipo de relevador ampliamente utilizado es el *relevador de lengüeta*, el cual se muestra en la figura 10-18. El relevador de lengüeta, como el relevador de armadura, utiliza una bobina electromagnética. Los contactos son lengüetas delgadas de material magnético y en general se localizan adentro de la bobina. Cuando no hay corriente en la bobina, las lengüetas están en la posición abierta que muestra la parte (b). Cuando hay corriente a través de la bobina, las lengüetas se ponen en contacto porque se magnetizan y se atraen entre sí como indica la parte (c).



(a) No energizado: continuidad desde la terminal 1 hasta la terminal 2

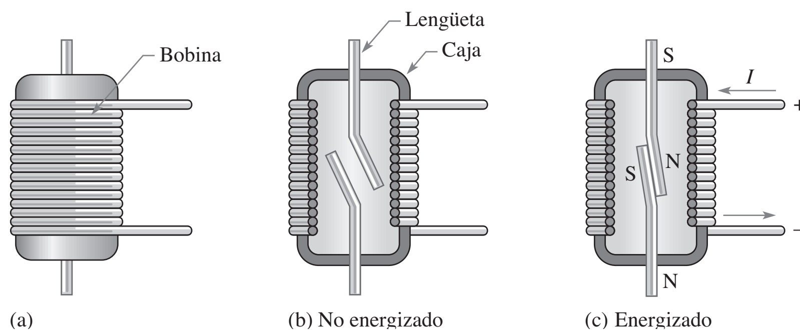
(b) Energizado: continuidad desde la terminal 1 hasta la terminal 3

(c) Estructura típica de un relevador

(d) Símbolo

▲ **FIGURA 10–17**

Estructura básica de un relevador de armadura unipolar de doble vía.



(a) (b) No energizado (c) Energizado

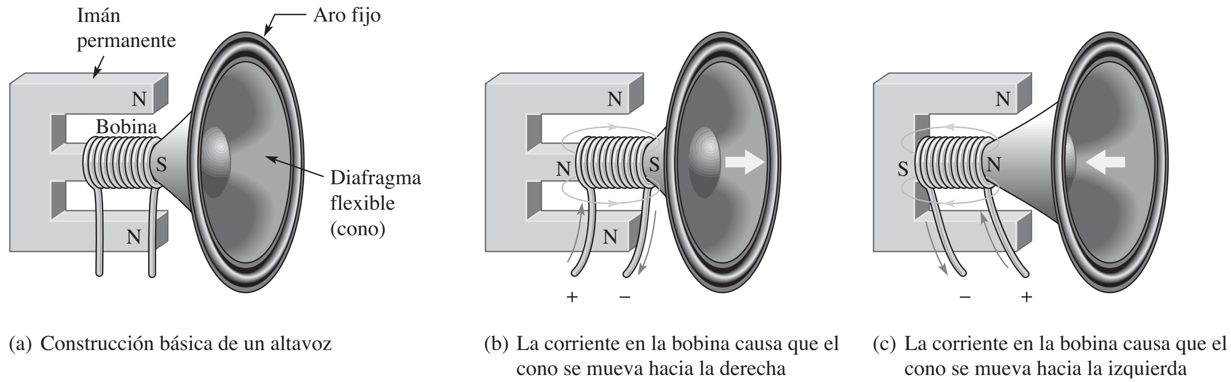
▲ **FIGURA 10–18**

Estructura básica de un relevador de lengüeta.

Los relevadores de lengüeta son superiores a los de armadura en el sentido de que son más rápidos, más confiables, y producen menos arcos por contacto. Sin embargo, su capacidad de manejo de corriente es menor que la de los relevadores de armadura y son más susceptibles al choque mecánico.

El altavoz

Un **altavoz** es un dispositivo electromagnético que convierte señales eléctricas en ondas sonoras. Comúnmente se utilizan altavoces de imán permanente en estéreos, radios y televisiones y su



(a) Construcción básica de un altavoz

(b) La corriente en la bobina causa que el cono se mueva hacia la derecha

(c) La corriente en la bobina causa que el cono se mueva hacia la izquierda

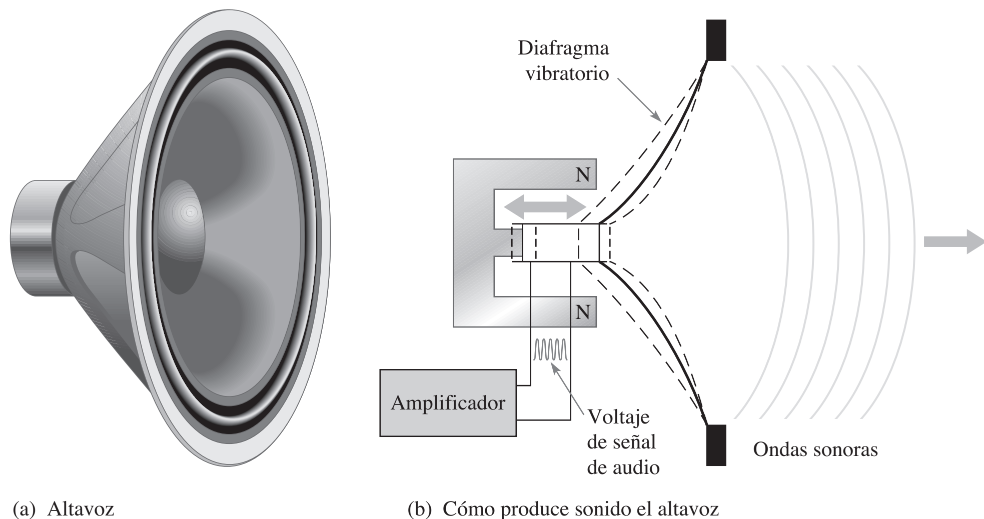
▲ **FIGURA 10–19**

Operación básica de un altavoz.

operación está basada en el principio de electromagnetismo. Un altavoz típico se compone tanto de un imán permanente como de un electroimán, según muestra la figura 10-19(a). El cono del altavoz consiste en un diafragma hecho de un material semejante al papel al cual está unido un cilindro hueco con una bobina alrededor de él, la que forma un electroimán. Uno de los polos del imán permanente se encuentra adentro de la bobina cilíndrica. Cuando hay corriente a través de la bobina en una dirección, la interacción del campo magnético permanente con el campo electromagnético permite que el cilindro se mueva hacia la derecha, como indica la figura 10-19(b). La corriente que circula a través de la bobina en la otra dirección causa que el cilindro se mueva hacia la izquierda, según muestra la parte (c).

El movimiento de la bobina cilíndrica permite que el diafragma flexible también se mueva hacia dentro o hacia fuera, según la dirección de la corriente de la bobina. La cantidad de corriente a través de la bobina determina la intensidad del campo magnético, el cual controla la cantidad que el diafragma se mueve.

Como ilustra la figura 10-20, cuando se aplica una señal de audio (voz o música) a la bobina, la corriente varía tanto en dirección como en cantidad. En respuesta, el diafragma vibra hacia dentro y hacia fuera en cantidades variables a velocidades variables correspondientes a la señal de audio. La vibración en el diafragma permite que el aire que está en contacto con el diafragma vibre del mismo modo. Estas vibraciones de aire se mueven a través del aire como ondas sonoras.



(a) Altavoz

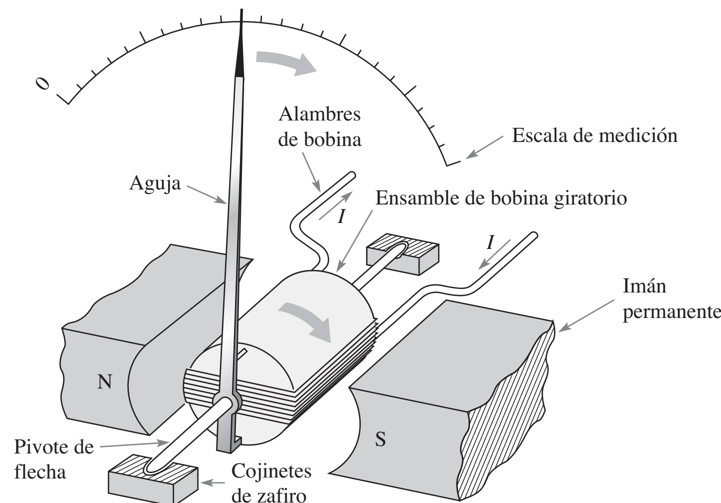
(b) Cómo produce sonido el altavoz

▲ **FIGURA 10–20**

El altavoz convierte los voltajes de señal de audio en ondas sonoras.

Movimiento de medidor

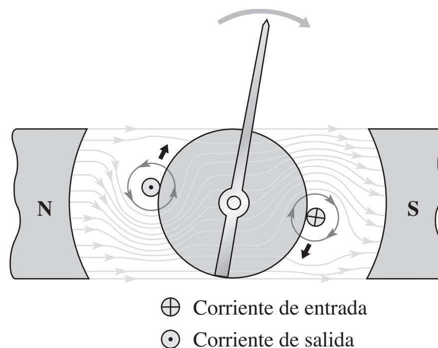
El movimiento de medidor d'Arsonval es el tipo más común utilizado en multímetros analógicos. En este tipo de movimiento de medidor, la aguja se deflexiona en proporción a la cantidad de corriente que pasa a través de la bobina. La figura 10-21 muestra un movimiento de medidor de d'Arsonval básico. Consta de una bobina de alambre arrollado alrededor de un ensamble montado sobre cojinetes que está colocada entre los polos de un imán permanente. En el ensamble móvil se fija una aguja. Si no hay corriente a través de la bobina, un mecanismo de resorte mantiene a la aguja en el extremo izquierdo (posición cero). Cuando hay corriente en la bobina, las fuerzas electromagnéticas actúan en ella y hacen que gire hacia la derecha. La cantidad de rotación depende de la cantidad de corriente.



◀ **FIGURA 10–21**

Movimiento básico de un medidor d'Arsonval.

La figura 10-22 ilustra cómo la interacción de los campos magnéticos produce rotación del ensamble de bobina. La corriente es hacia dentro en la "cruz" y hacia fuera en el "punto" en el devanado único que se muestra. La corriente hacia dentro produce un campo magnético, en el sentido de las manecillas del reloj, que refuerza el campo magnético permanente localizado encima de él. El resultado es una fuerza dirigida hacia abajo a la derecha de la bobina como se muestra. La corriente hacia fuera produce un campo electromagnético, en sentido contrario al de las manecillas del reloj, que refuerza el campo magnético permanente situado debajo de él. El resultado es una fuerza dirigida hacia arriba a la izquierda de la bobina como se ilustra. Estas fuerzas producen una rotación en el sentido de las manecillas del reloj del ensamble de bobina y un mecanismo de resorte se opone a ellas. Las fuerzas indicadas y la fuerza del resorte se equilibran con el valor de la corriente. Cuando se interrumpe la corriente, la fuerza del resorte regresa a la aguja a su posición cero.



◀ **FIGURA 10–22**

Cuando el campo electromagnético interactúa con el campo magnético permanente, se ejercen fuerzas en el ensamble de bobina rotatoria, lo cual provoca que ésta gire en el sentido de las manecillas del reloj y, por tanto, la aguja se deflexiona.

Disco magnético, cabeza de lectura y escritura de cinta

En la figura 10-23 se muestra un diagrama simplificado de un disco magnético con operación de lectura y escritura en la superficie de una cinta. Se escribe un bit de datos (1 o 0) en la superficie magnética por magnetización de un pequeño segmento de la superficie al moverse ésta mediante la cabeza de escritura. La dirección de las líneas de flujo magnéticas es controlada por la dirección del pulso de corriente que circula en el devanado, como indica la figura 10-23(a). En el entrehierro localizado en la cabeza de escritura, el flujo magnético toma una ruta a través de la superficie del dispositivo de almacenamiento. Esto magnetiza un pequeño punto en la superficie en la dirección del campo. Un punto magnetizado que tenga cierta polaridad representa un 1 binario, y un punto de polaridad opuesta representa un 0 binario. Una vez que un punto situado en la superficie se magnetiza, permanece así hasta que es sobreescrito con un campo magnético opuesto.

Cuando la superficie magnética pasa frente a la cabeza de lectura, los puntos magnetizados producen campos magnéticos en la cabeza de lectura, los cuales inducen pulsos de voltaje en el devanado. La polaridad de estos pulsos depende de la dirección del punto magnetizado e indica si el bit guardado es un 1 o un 0. Este proceso se ilustra en la figura 10-23(b). Con frecuencia las cabezas de escritura y lectura se combinan en una sola unidad.

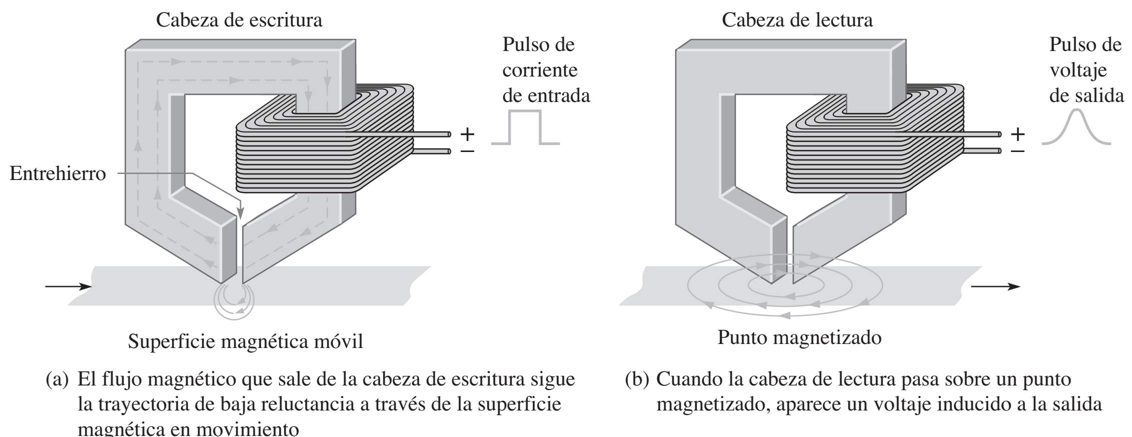
El disco magneto-óptico

El disco magneto-óptico utiliza un electroimán y rayos láser para leer y escribir (grabar) datos en una superficie magnética. Los discos magneto-ópticos se formatean en pistas y sectores similares a los discos flexibles y discos duros magnéticos. Sin embargo, debido la capacidad de un rayo láser de ser dirigido con precisión hacia un punto extremadamente pequeño, los discos magneto-ópticos son capaces de guardar muchos más datos que los discos duros magnéticos estándar.

La figura 10-24(a) ilustra una pequeña área de sección transversal de un disco antes de grabar, con un electroimán posicionado debajo de ella. Minúsculas partículas magnéticas, representadas por flechas, se magnetizan en la misma dirección.

La escritura (grabación) en el disco se realiza aplicando un campo magnético externo opuesto a la dirección de las partículas magnéticas, como indica la figura 10-24(b), y dirigiendo luego un rayo láser de alta potencia para calentar el disco en un punto preciso donde se ha de guardar un 1 binario. El material del disco, una aleación magneto-óptico, es altamente resistente a la magnetización a temperatura ambiente; pero en el punto donde el rayo láser calienta el material, la dirección inherente del magnetismo se invierte mediante el campo magnético externo producido por el electroimán. En puntos donde se van a guardar ceros binarios, no se aplica el rayo láser y la dirección inherente hacia arriba de la partícula magnética permanece.

Como se ilustra en la figura 10-24(c), la lectura de datos en el disco se logra interrumpiendo el campo magnético externo y dirigiendo un rayo láser de alta potencia hacia un punto donde se

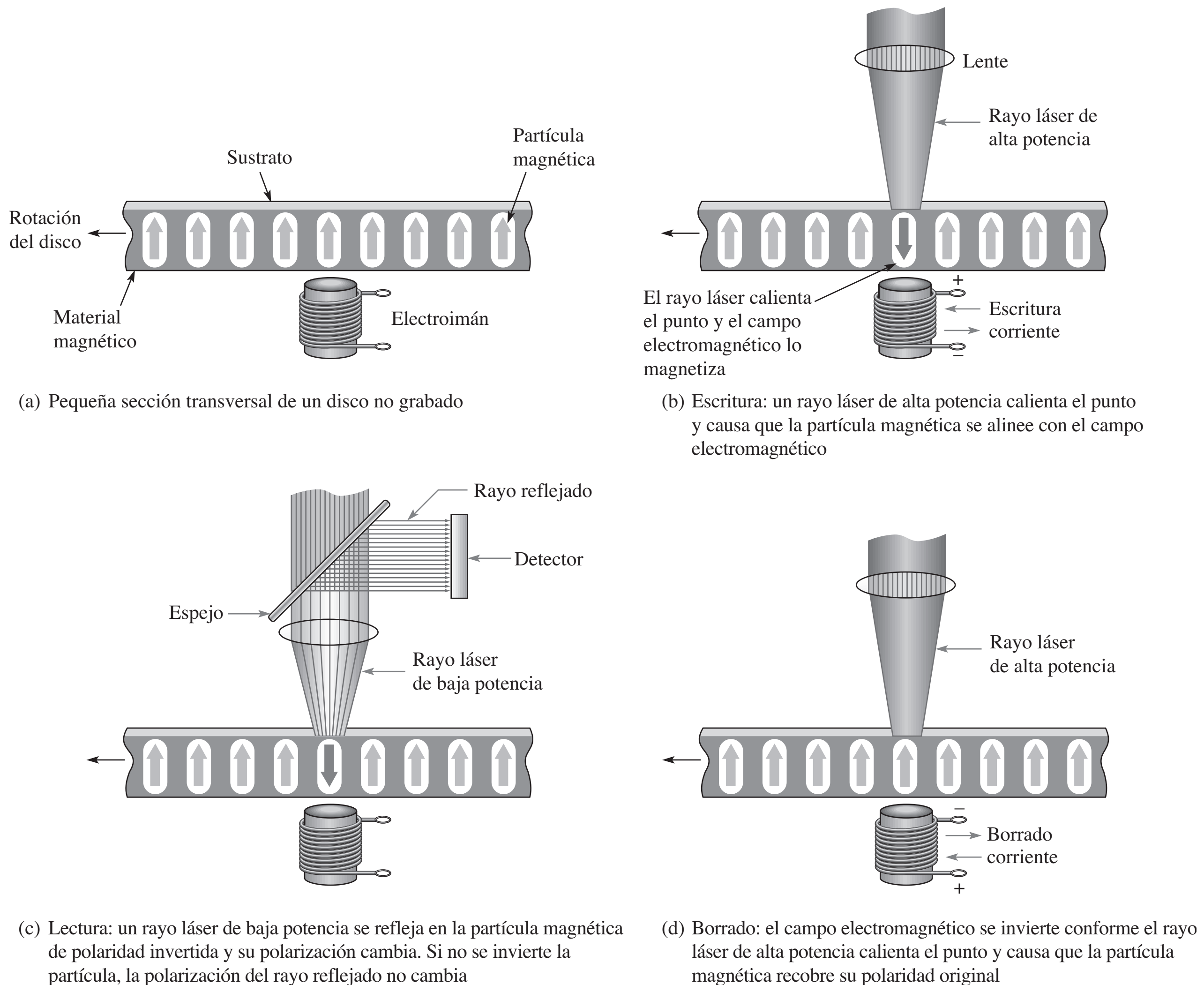


(a) El flujo magnético que sale de la cabeza de escritura sigue la trayectoria de baja reluctancia a través de la superficie magnética en movimiento

(b) Cuando la cabeza de lectura pasa sobre un punto magnetizado, aparece un voltaje inducido a la salida

▲ **FIGURA 10–23**

Función de lectura y escritura sobre una superficie magnética.



▲ **FIGURA 10–24**

Concepto básico del disco magneto-óptico.

ha de leer un bit. Básicamente, si un 1 binario está guardado en el punto (magnetización invertida), el rayo láser se refleja y su polarización cambia; pero si está almacenado un 0 binario, la polarización del rayo láser reflejado no cambia. Un detector percibe la diferencia de polaridad del rayo láser reflejado para determinar si el bit que se va a leer es un 1 o un 0.

La figura 10-24(d) muestra que el disco se borró al restaurar la dirección magnética original de cada partícula mediante la inversión del campo magnético externo y la aplicación del rayo láser de alta potencia.

REPASO DE LA SECCIÓN 10-3

1. Explique la diferencia que hay entre un solenoide y un relevador.
2. ¿Cómo se llama la parte móvil de un solenoide?
3. ¿Cómo se llama la parte móvil de un relevador?
4. ¿En que principios básicos está basado el movimiento de medidor d'Arsonval?

10–4 HISTÉRESIS MAGNÉTICA

Cuando se aplica una fuerza magnetizante a un material, la densidad de flujo del material cambia en cierto modo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar la histéresis magnética**
  - Enunciar la fórmula de la intensidad de campo magnético
  - Analizar una curva de histéresis
  - Definir el término *retentividad*

Intensidad de campo magnético (*H*)

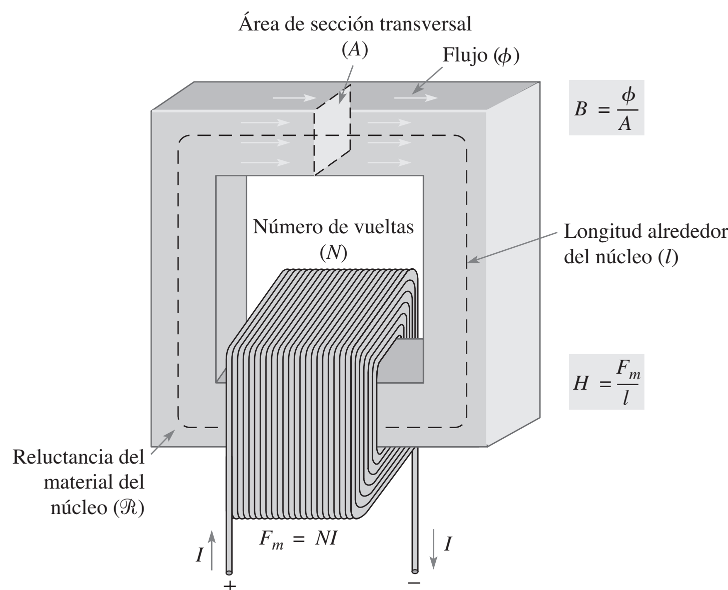
La **intensidad de campo magnético** (llamada también *fuerza magnetizante*) en un material se define como la fuerza magnetomotriz (F_m) por unidad de longitud (l) del material, y se expresa mediante la fórmula siguiente. La unidad de intensidad de campo magnético (H) es el ampere-vueltas por metro (ampere-turn/metro, At/m).

Ecuación 10–6

$$H = \frac{F_m}{l}$$

donde $F_m = NI$. Observe que la intensidad de campo magnético depende del número de vueltas (N) de la bobina de alambre, de la corriente (I) que circule a través de la bobina, y de la longitud (l) del material. No depende del tipo de material.

Como $\phi = F_m/\mathcal{R}$, al incrementarse F_m, el flujo aumenta. Asimismo, la intensidad del campo magnético (H) se incrementa. Recuerde que la densidad de flujo (B) es el flujo por área de sección transversal unitaria ($B = \phi/A$), por lo que B también es proporcional a H. La curva que muestra cómo están relacionadas estas cantidades (B y H) se llama curva B-H o curva de histéresis. Los parámetros que influyen tanto en B como en H se ilustran en la figura 10-25.



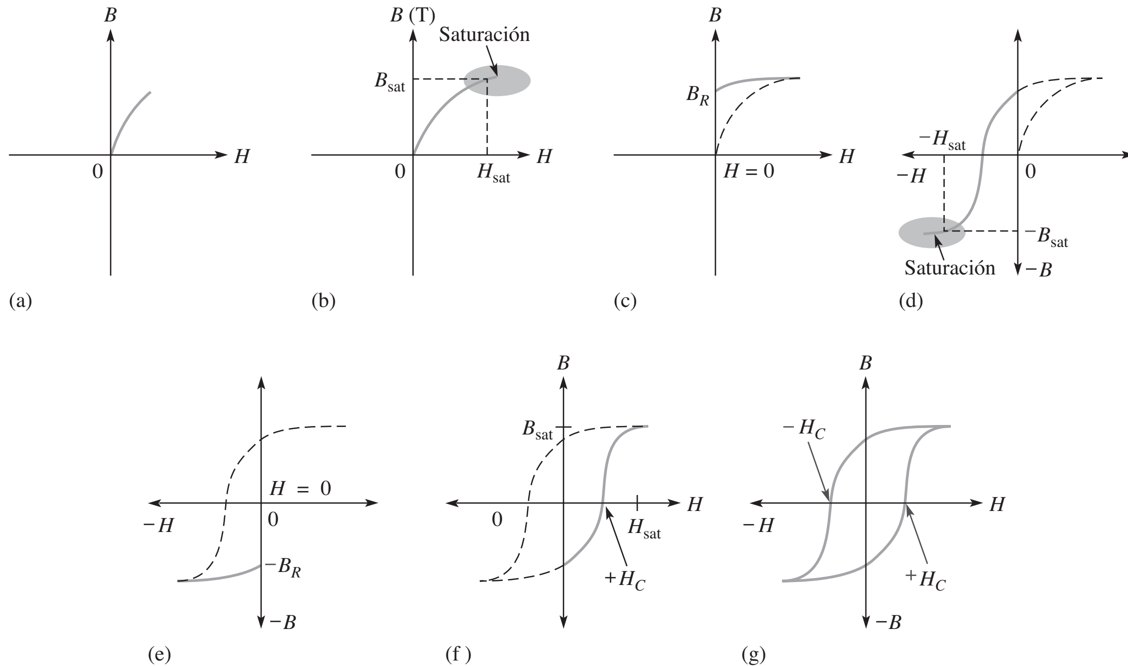
▲ **FIGURA 10–25**

Parámetros que determinan la intensidad de un campo magnético (*H*) y la densidad de flujo (*B*).

La curva de histéresis y retentividad

La **histéresis** es una característica de un material magnético por la cual un cambio de magnetización retrasa la aplicación de la intensidad de campo magnético. La intensidad de campo magnético (H) puede ser incrementada o reducida con facilidad variando la corriente a través de la bobina de alambre, y puede ser invertida invirtiendo la polaridad del voltaje presente en la bobina.

La figura 10-26 ilustra el desarrollo de la curva de histéresis. Suponga que un núcleo magnético está desmagnetizado de modo que $B = 0$. Conforme la intensidad de campo magnético (H) se incrementa desde cero, la densidad de flujo (B) se incrementa proporcionalmente, como indica la curva de la figura 10-26(a). Cuando H alcanza cierto valor, B comienza a nivelarse. A medida que H continúa incrementándose, B alcanza un valor de saturación (B_{sat}) cuando H alcanza un valor (H_{sat}), como ilustra la figura 10-26(b). Una vez que se llega a la saturación, un incremento adicional de H no incrementará B.



▲ **FIGURA 10–26**

Desarrollo de una curva de histéresis magnética.

Ahora, si H disminuye a cero, B regresará por una ruta diferente a un valor residual (B_R), según muestra la figura 10-26(c). Esto indica que el material continúa magnetizado incluso cuando la intensidad de campo magnético es de cero ($H = 0$). La capacidad de un material de mantener un estado magnetizado sin intensidad de campo magnético se llama **retentividad**. La retentividad de un material representa el flujo máximo que puede ser retenido después de que el material ha sido magnetizado hasta la saturación y se indica mediante la relación de B_R a B_{sat}.

La inversión de la intensidad de campo magnético está representada por los valores negativos de H incluidos en la curva, y se logra invirtiendo la corriente en la bobina de alambre. Un incremento de H en la dirección negativa permite que ocurra la saturación con un valor ($-H_{sat}$) donde la densidad de flujo está a su valor negativo máximo, como indica la figura 10-26(d).

Cuando la intensidad de campo magnético se elimina ($H = 0$), la densidad de flujo se va hacia su valor residual negativo ($-B_R$), como ilustra la figura 10-26(e). A partir del valor $-B_R$, la densidad de flujo sigue la curva indicada en la parte (f) de regreso a su valor positivo máximo cuando la intensidad de campo magnético es iguala H_{sat} en la dirección positiva.

La curva B-H completa se muestra en la figura 10-26(g) y se llama *curva de histéresis*. La intensidad de campo magnético requerida para reducir la densidad de flujo a cero es llamada *fuerza coercitiva*, H_C.

Los materiales con baja retentividad no retienen el campo magnético muy bien, mientras que aquellos con alta retentividad exhiben valores de B_R muy cercanos al valor de saturación de B. Según la aplicación, la retentividad en un material magnético puede ser una ventaja o una desventaja. En imanes permanentes y cintas magnéticas, por ejemplo, se requiere alta retentividad; mientras que en cabezas de lectura y escritura de grabadoras de cinta, es necesaria una baja retentividad. En motores de ca, la retentividad es indeseable porque el campo magnético residual debe ser superado cada vez que se invierte la corriente, de lo contrario se desperdicia energía.

REPASO DE LA SECCIÓN 10-4

1. **En un núcleo devanado con una bobina de alambre, ¿cómo afecta el incremento de la corriente su densidad de flujo?**
2. **Defina el término *retentividad*.**
3. **¿Por qué se requiere una baja retentividad para las cabezas de lectura y escritura de una grabadora de cinta, pero alta retentividad para cintas magnéticas?**

10–5 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, se produce un voltaje entre los extremos del conductor. Este principio se conoce como inducción electromagnética y el voltaje resultante es un voltaje inducido. El principio de inducción electromagnética es lo que posibilita la existencia de transformadores, generadores eléctricos, y muchos otros dispositivos.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar el principio de inducción electromagnética**
  - Explicar cómo se induce voltaje en un conductor en un campo magnético
  - Determinar la polaridad de un voltaje inducido
  - Analizar las fuerzas que actúan sobre un conductor en un campo magnético
  - Enunciar la ley de Faraday
  - Enunciar la ley de Lenz

Movimiento relativo

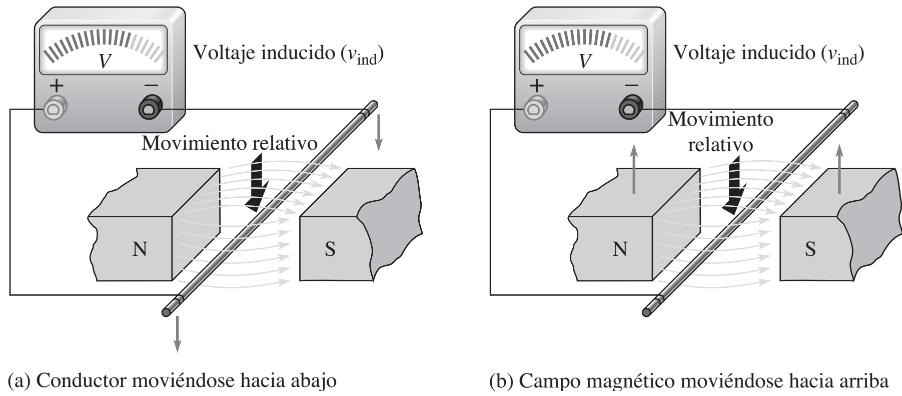
Cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, existe un movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético. Asimismo, cuando un campo magnético se mueve más allá de un conductor estacionario, también existe movimiento relativo. En ambos casos, este movimiento relativo produce un **voltaje inducido (v_{ind})** en el conductor, como indica la figura 10-27. La letra minúscula v denota voltaje instantáneo. Sólo se induce voltaje cuando el conductor "corta" las líneas magnéticas como se muestra.

La cantidad de voltaje inducido (v_{ind}) depende de la densidad de flujo, B, de la longitud del conductor, l, expuesta al campo magnético, y de la velocidad a la cual el conductor y el campo magnético se mueven uno con respecto al otro. Mientras más rápida es la velocidad relativa, más grande es el voltaje inducido. La ecuación para voltaje inducido en un conductor es

Ecuación 10–7

$$v_{ind} = Blv$$

donde v_{ind} es el voltaje inducido, B es la densidad de flujo en teslas, l es la longitud del conductor expuesta al campo magnético expresada en metros, y v es la velocidad relativa en metros por segundo.

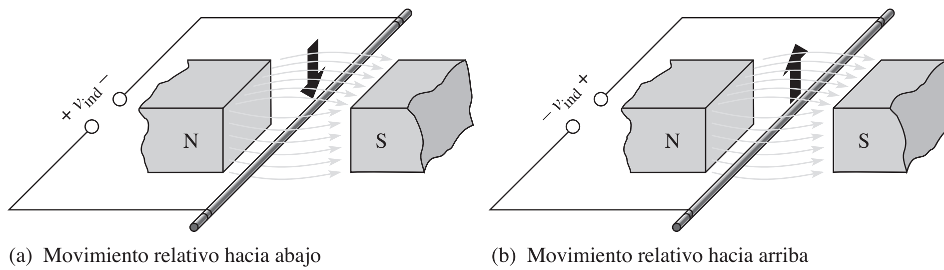


▲ **FIGURA 10–27**

Movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético.

Polaridad del voltaje inducido

Si el conductor mostrado en la figura 10-27 se mueve primero de un modo y luego de otro en el campo magnético, se observará una inversión de la polaridad del voltaje inducido. A medida que el conductor se mueve hacia abajo, la polaridad es como ilustra la parte (b) de la figura.

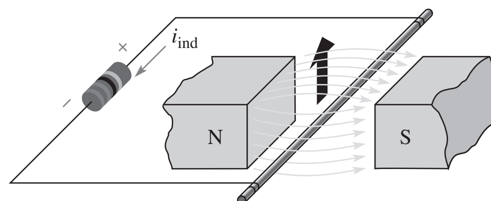


▲ **FIGURA 10–28**

La polaridad de un voltaje inducido depende de la dirección del movimiento.

Corriente inducida

Cuando se conecta un resistor de carga al conductor de la figura 10-28, el voltaje inducido por el movimiento relativo en el campo magnético provocará una corriente en la carga, según muestra la figura 10-29. Esta corriente se llama **corriente inducida (i_{ind})**. La letra minúscula *i* denota corriente instantánea.



◀ **FIGURA 10–29**

Corriente inducida en una carga conforme el conductor se mueve a través del campo magnético.

La acción de producir un voltaje y una corriente resultante en una carga moviendo un conductor a través de un campo magnético es la base de los generadores eléctricos. Un solo conductor tendrá una pequeña corriente inducida, así que los generadores prácticos utilizan bobinas con muchas vueltas. El concepto de un conductor adentro de un campo magnético móvil es la base de la inductancia en un circuito eléctrico.

BIOGRAFÍA

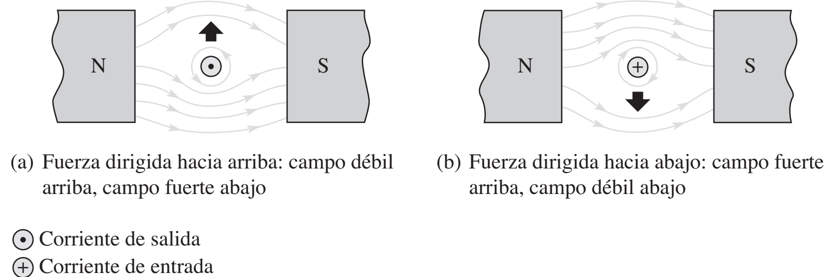


Michael Faraday
1791–1867

Faraday fue un físico y químico inglés al que se recuerda mejor por su contribución al entendimiento del electromagnetismo. Descubrió que la electricidad podía ser producida moviendo un imán adentro de una bobina de alambre, y fue capaz de construir el primer motor eléctrico. Posteriormente construyó el primer generador y transformador electromagnéticos. El enunciado de los principios de inducción electromagnética se conoce hoy en día como ley de Faraday. Asimismo, la unidad de capacitancia, el *farad*, fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Biblioteca del Congreso estadounidense).

Fuerzas que actúan sobre un conductor que transporta corriente en un campo magnético (Acción de motor)

La figura 10-30(a) muestra una corriente dirigida hacia fuera a través de un conductor en un campo magnético. El campo electromagnético establecido por la corriente interactúa con el campo magnético permanente; por tanto, las líneas de fuerza permanentes que están por encima del conductor tienden a deflexionarse hacia abajo por debajo del conductor, porque se oponen a la dirección de las líneas de fuerza electromagnéticas. Por consiguiente, la densidad de flujo encima del conductor se reduce y el campo magnético se debilita. La densidad de flujo debajo del conductor se incrementa y el campo magnético se intensifica. Resulta una fuerza dirigida hacia arriba que actúa sobre el conductor y éste tiende a moverse hacia el campo magnético más débil.



▲ **FIGURA 10–30**

Fuerzas sobre un conductor que transporta corriente en un campo magnético (acción de motor).

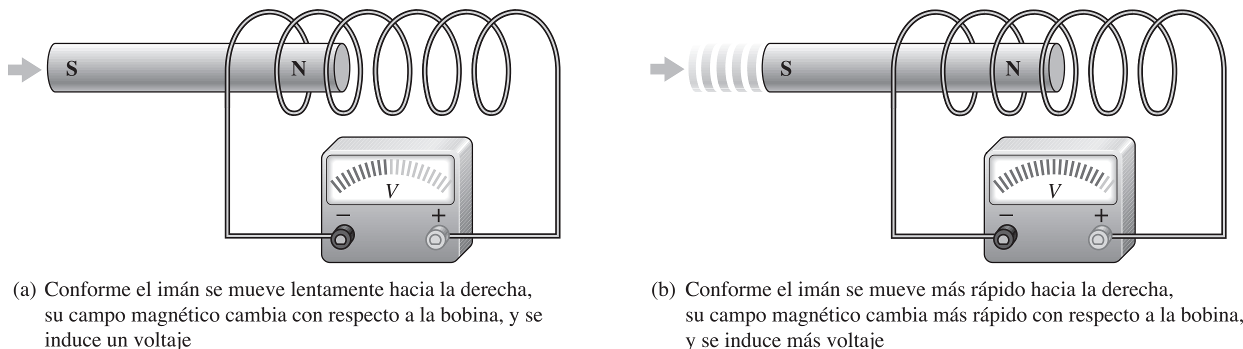
La figura 10-30(b) muestra la corriente hacia dentro, la cual produce una fuerza sobre el conductor que va dirigida hacia abajo. Esta fuerza es la base de los motores eléctricos. Su descubrimiento fue uno de los factores que condujeron a la Revolución Industrial.

Ley de Faraday

Michael Faraday descubrió el principio de **inducción electromagnética** en 1831. Encontró que al mover un imán a través de una bobina de alambre se inducía voltaje en la bobina, y que cuando se proporcionaba una trayectoria completa, el voltaje inducido provocaba una corriente inducida, como ya se vio. Dos observaciones de Faraday se enuncian como sigue:

1. La cantidad de voltaje inducido en una bobina es directamente proporcional a la rapidez de cambio del campo magnético con respecto a la bobina ($d\phi/dt$).
2. La cantidad de voltaje inducido en una bobina es directamente proporcional al número de vueltas de alambre que hay en la bobina (N).

La primera observación de Faraday se demuestra en la figura 10-31, donde una barra imantada se mueve a través de una bobina, con lo que se crea un campo magnético cambiante. En la par-



(a) Conforme el imán se mueve lentamente hacia la derecha, su campo magnético cambia con respecto a la bobina, y se induce un voltaje

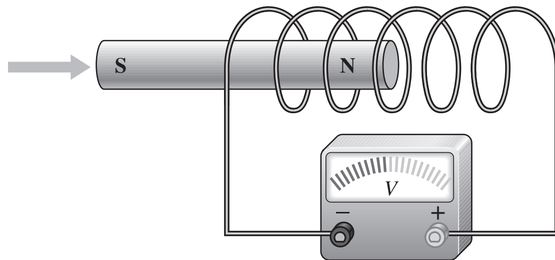
(b) Conforme el imán se mueve más rápido hacia la derecha, su campo magnético cambia más rápido con respecto a la bobina, y se induce más voltaje

▲ **FIGURA 10–31**

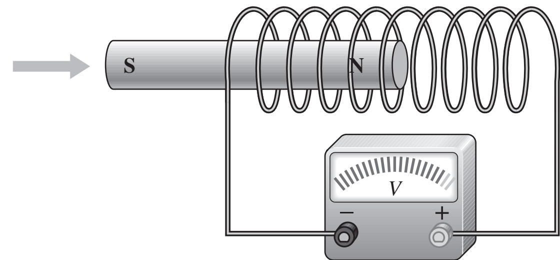
Demostración de la primera observación de Faraday: la cantidad de voltaje inducido es directamente proporcional a la velocidad de cambio del campo magnético con respecto a la bobina.

te (a) de la figura, el imán se mueve a cierta velocidad y se produce cierto voltaje inducido como se indica. En la parte (b), el imán se mueve más rápido por la bobina y se crea un voltaje inducido más grande.

La segunda observación de Faraday se demuestra en la figura 10-32. En la parte (a), el imán se mueve a través de la bobina y se induce un voltaje en la forma indicada. En la parte (b), el imán se mueve a la misma velocidad por una bobina que tiene un mayor número de vueltas. El mayor número de vueltas crea un mayor voltaje inducido.



(a) El imán se mueve a través de una bobina e induce voltaje



(b) El imán se mueve a la misma velocidad a través de una bobina con más vueltas (espiras) e induce más voltaje

▲ **FIGURA 10–32**

Demostración de la segunda observación de Faraday: la cantidad de voltaje inducido es directamente proporcional al número de vueltas que haya en la bobina.

La **ley de Faraday** se enuncia como sigue:

El voltaje inducido a través de una bobina de alambre es igual al número de vueltas que haya en la bobina multiplicado por la velocidad de cambio del flujo magnético.

La ley de Faraday se expresa en forma de ecuación como

$$v_{\text{ind}} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$$

Ecuación 10–8

EJEMPLO 10–7 Aplique la ley de Faraday para determinar el voltaje inducido a través de una bobina con 500 vueltas localizada en un campo magnético que cambia a razón de 8000 μWb/s.

Solución

$$v_{\text{ind}} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right) = (500\text{ t})(8000\ \mu\text{Wb/s}) = \mathbf{4.0\ V}$$

Problema relacionado Determine el voltaje inducido a través de una bobina con 250 vueltas localizada en un campo magnético que cambia a razón de 50 μWb/s.

Ley de Lenz

La ley de Faraday establece que un campo magnético cambiante induce un voltaje en una bobina que es directamente proporcional a la velocidad de cambio del campo magnético y al número de vueltas que haya en la bobina. La ley de Lenz define la polaridad o dirección del voltaje inducido.

Cuando la corriente que pasa a través de una bobina cambia, se crea un voltaje inducido a consecuencia del campo electromagnético cambiante y la polaridad del voltaje inducido es tal que siempre se opone al cambio de corriente.

REPASO DE LA SECCIÓN 10-5

1. ¿Cuál es el voltaje inducido que circula a través de un conductor estacionario en un campo magnético estacionario?
2. Cuando la velocidad a la cual el conductor se mueve a través de un campo magnético se incrementa, ¿el voltaje inducido aumenta, disminuye o no cambia?
3. ¿Qué sucede cuando en un campo magnético existe corriente circulando por un conductor?

10–6 Aplicaciones de la inducción electromagnética

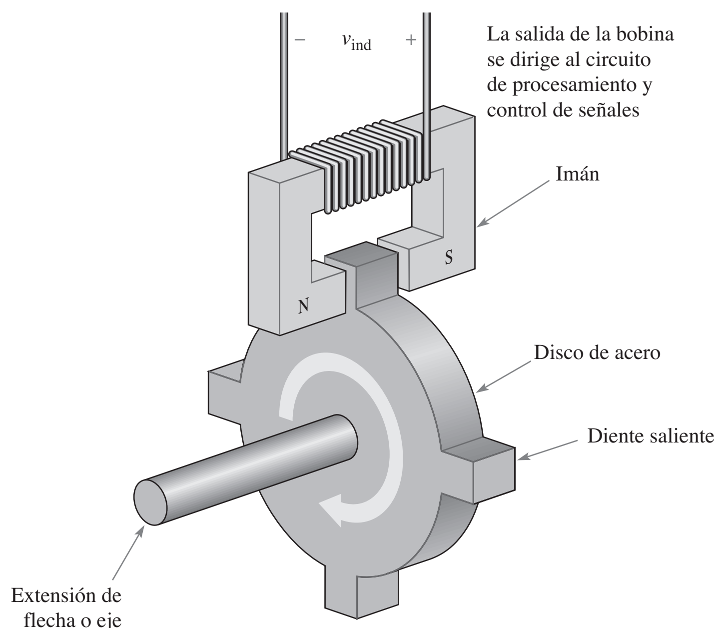
Dos aplicaciones de la inducción electromagnética son: el sensor de posición de un cigüeñal automotriz, y un generador de cd. Aunque existen muchas aplicaciones variadas, éstas dos son representativas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir algunas aplicaciones de la inducción electromagnética**
  - Explicar cómo funciona un sensor de posición de un cigüeñal
  - Explicar cómo funciona un generador de cd

Sensor de posición de un cigüeñal automotriz

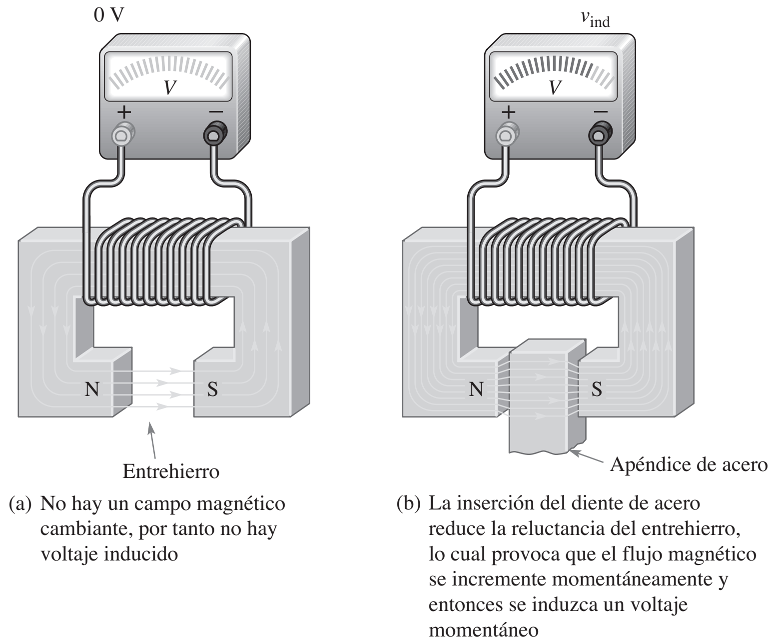
Una aplicación automotriz de la inducción electromagnética implica un tipo de sensor de motor que detecta la posición del cigüeñal. El controlador electrónico de motor instalado en muchos automóviles utiliza la posición del cigüeñal para ajustar el tiempo de encendido y, en ocasiones, ajustar el sistema de control del combustible. La figura 10-33 muestra el concepto básico. Un disco de acero se une al cigüeñal del motor por medio de una barra de extensión; en el disco, los dientes salientes representan posiciones específicas del cigüeñal.



▲ **FIGURA 10–33**

Sensor de posición de cigüeñal que produce un voltaje cuando un apéndice pasa por el entrehierro del imán.

Conforme el disco de acero gira con el cigüeñal, los dientes pasan periódicamente a través del entrehierro del imán permanente. Como la reluctancia del acero es mucho más baja que la del aire (es posible establecer un campo magnético en el acero mucho más fácilmente que en el aire), el flujo magnético se incrementa de repente en el momento en que un diente entra en el entrehierro, y esto provoca una inducción de voltaje a través de la bobina. Este proceso se ilustra en la figura 10-34. El circuito de control electrónico del motor utiliza el voltaje inducido como indicador de la posición del cigüeñal.



(a) No hay un campo magnético cambiante, por tanto no hay voltaje inducido

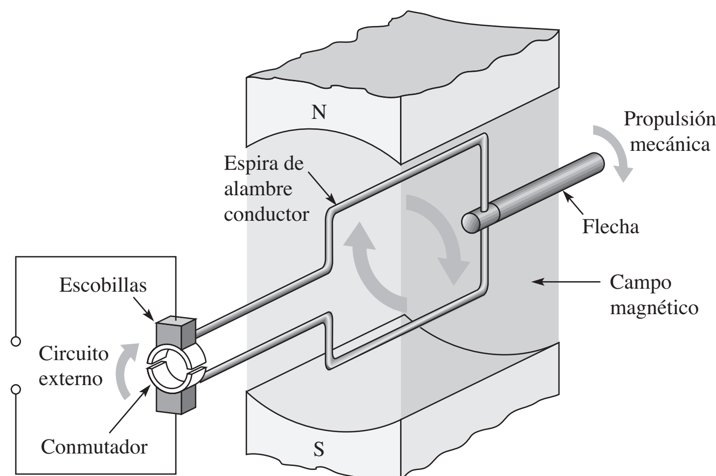
(b) La inserción del diente de acero reduce la reluctancia del entrehierro, lo cual provoca que el flujo magnético se incremente momentáneamente y entonces se induzca un voltaje momentáneo

▲ **FIGURA 10–34**

Conforme el diente de acero pasa por el entrehierro del imán, la bobina detecta un cambio en el campo magnético, y un voltaje es inducido.

Generador de CD

La figura 10-35 muestra un generador de cd simplificado compuesto de una sola espira de alambre en un campo magnético permanente. Observe que cada extremo de la espira de alambre está conectado a un anillo partido. Este anillo metálico conductor se llama *conmutador*. Conforme la espira de alambre gira en el campo magnético, el anillo conmutador partido también gira. Cada



◀ **FIGURA 10–35**

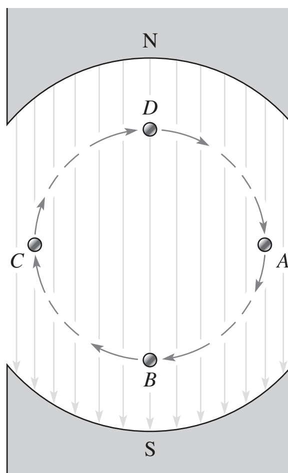
Generador de cd simplificado.

una de las mitades del anillo partido frota contra los contactos fijos, llamados *escobillas*, y conecta la espira de alambre a un circuito externo.

Conforme la espira de alambre gira a través del campo magnético, corta las líneas de flujo a varios ángulos, como ilustra la figura 10-36. En la posición *A* de su rotación, la espira de alambre efectivamente se está moviendo en dirección paralela al campo magnético. Por consiguiente, en este momento, la velocidad a la cual corta las líneas de flujo magnético es de cero. Conforme la espira cambia de la posición *A* a la posición *B*, corta las líneas de flujo a más velocidad. En la posición *B*, se mueve efectivamente en sentido perpendicular al campo magnético y, por tanto, corta un número máximo de líneas. Conforme la espira gira desde la posición *B* hasta la posición *C*, la velocidad a la cual corta las líneas de flujo disminuye a un mínimo (cero) en *C*. A partir de la posición *C* y hasta la posición *D*, la velocidad a la cual la espira corta las líneas de flujo se incrementa a un máximo en *D* y luego de regreso otra vez a un mínimo en *A*.

▶ **FIGURA 10–36**

Vista de un extremo de una espira de alambre conductor que atraviesa el campo magnético.



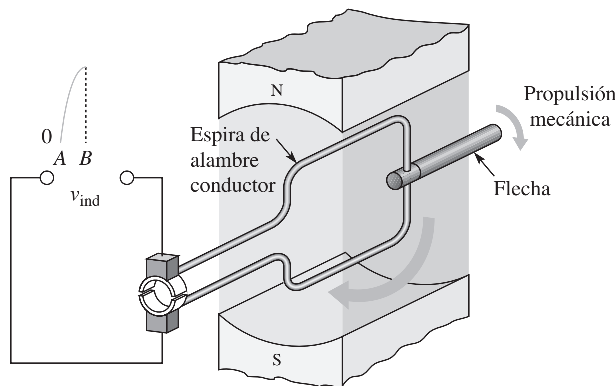
Como ya se vio, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, se induce un voltaje, y según la ley de Faraday, la cantidad de voltaje inducido es proporcional al número de espiras y a la velocidad a la cual se mueve el conductor con respecto al campo magnético. Ahora bien, se sabe que el ángulo al cual se mueve el conductor, con respecto a las líneas de flujo magnético, determina la cantidad de voltaje inducido porque la velocidad a la cual el conductor corta las líneas de flujo depende del ángulo de su movimiento.

La figura 10-37 ilustra cómo se induce voltaje en el circuito externo a medida que la espira única gira en el campo magnético. Suponga que la espira se encuentra en su posición horizontal instantánea, por lo que el voltaje inducido es de cero. Conforme la espira continúa girando, el voltaje inducido se incrementa a un máximo en la posición *B*, según muestra la parte (a) de la figura. Entonces, conforme la espira continúa de *B* a *C*, el voltaje disminuye hasta cero en la posición *C*, como indica la parte (b).

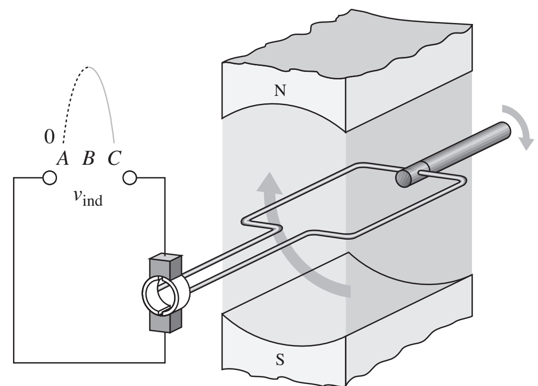
Durante la segunda mitad de la revolución, mostrada en la figura 10-37(c) y (d), las escobillas cambian a secciones opuestas del conmutador, por lo que la polaridad de voltaje no cambia entre las terminales de salida. Por tanto, conforme la espira gira desde la posición *C* hasta la posición *D* y luego regresa a la posición *A*, el voltaje se incrementa desde 0 en *C* hasta un máximo en *D* y de regreso a cero en *A*.

La figura 10-38 muestra cómo varía el voltaje inducido conforme la espira en el generador de cd realiza varias revoluciones (tres en este caso). Este voltaje es un voltaje de cd porque sus polaridades no cambian. No obstante, el voltaje pulsante se encuentra entre cero y su valor máximo.

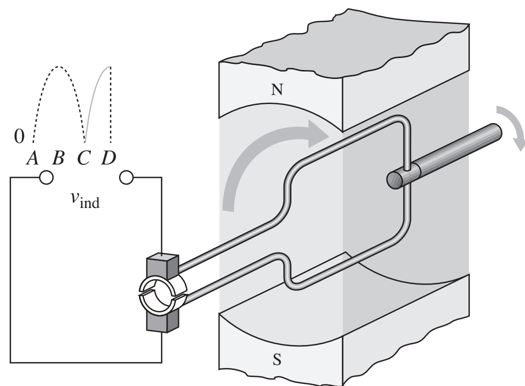
Cuando se agregan más espiras, el voltaje inducido entre las terminales de cada espira se combina entre las terminales de salida. Como los voltajes están desfasados entre sí, no alcanzan sus valores máximo o de cero al mismo tiempo. Con dos espiras se produce un voltaje de cd menos pulsante, según muestra la figura 10-39. Las variaciones pueden ser atenuadas aún más empleando filtros para lograr un voltaje de cd casi constante. (Los filtros se abordan en el capítulo 18.)



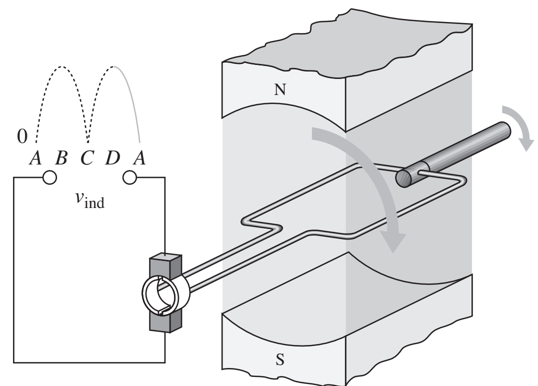
(a) Posición B: la espira se mueve en dirección perpendicular a las líneas de flujo, y el voltaje alcanza un máximo



(b) Posición C: la espira se mueve en dirección paralela a las líneas de flujo, y el voltaje es cero



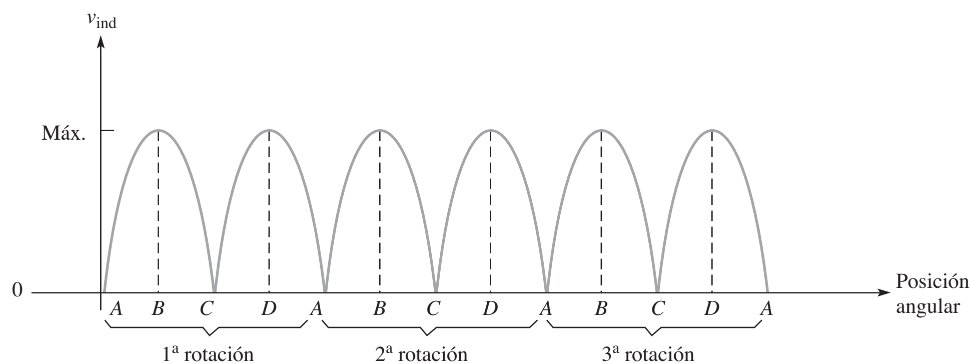
(c) Posición D: la espira se mueve en dirección perpendicular a las líneas de flujo, y el voltaje es máximo



(d) Posición D: la espira se mueve en dirección paralela a las líneas de flujo, y el voltaje es cero

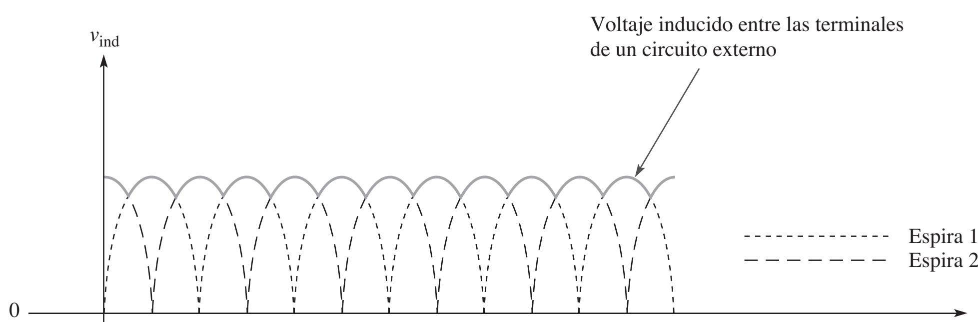
▲ **FIGURA 10–37**

Operación de un generador de cd básico.



◀ **FIGURA 10–38**

Voltaje inducido con tres rotaciones de la espira del alambre conductor en el generador de cd.

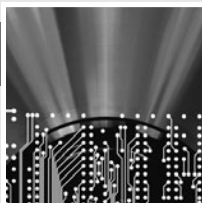


◀ **FIGURA 10–39**

Voltaje inducido por un generador de dos espiras. Hay mucha menos variación en el voltaje inducido.

REPASO DE LA SECCIÓN 10-6

1. Si se detiene el disco de acero colocado en el sensor de posición del cigüeñal, con el diente en el entrehierro del imán, ¿cuál es el voltaje inducido?
2. ¿Qué le sucede al voltaje inducido si la espira localizada en el generador de cd básico empieza a girar de repente más rápido?



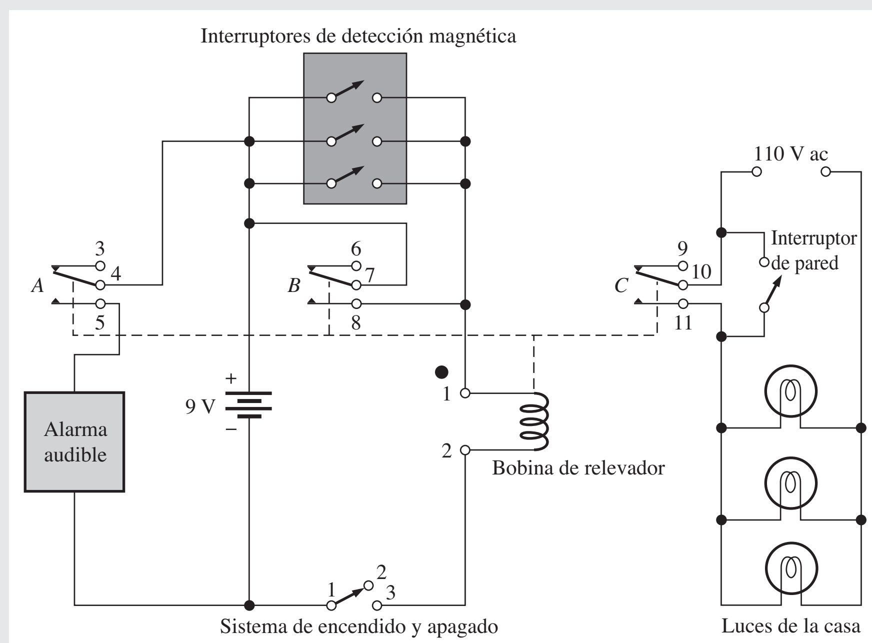
Una aplicación de circuito

El relevador es un tipo común de dispositivo electrónico que se utiliza en muchos tipos de aplicaciones de control. Con un relevador, un voltaje más bajo, como el que procede de una batería, se puede utilizar para cambiar a un voltaje mucho más alto, tal como los 110 V de un tomacorriente de ca. En seguida se verá cómo es posible utilizar un relevador en un sistema de alarma contra robos.

El diagrama ilustrado en la figura 10-40 muestra un sistema de alarma contra intrusiones que utiliza un relevador para encender una alarma audible (sirena) y luces. El sistema opera con una batería de 9 V de modo que, incluso si la energía que llega a la casa se interrumpe, la alarma audible seguirá funcionando.

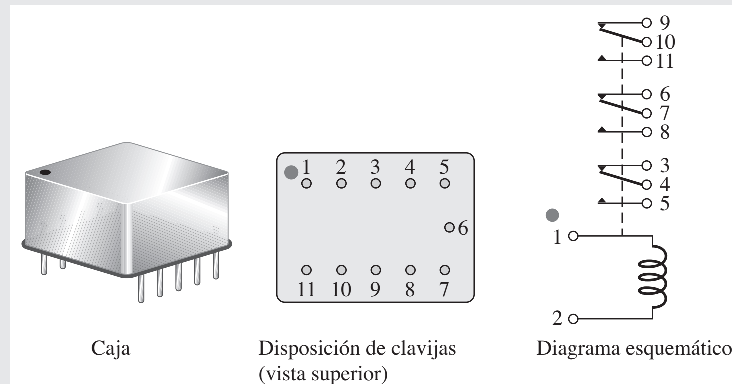
Los interruptores de detección son interruptores magnéticos normalmente abiertos (NA) conectados en paralelo y localizados en ventanas y puertas. El relevador es un dispositivo tripolar de doble vía que opera con un voltaje de bobina de 9 V y consume aproximadamente 50 mA. Cuando ocurre una intrusión, uno de los interruptores se cierra y permite el paso de corriente proveniente de la batería hacia la bobina del relevador, la cual energiza el relevador y permite que los tres juegos de contactos normalmente abiertos se cierren. El cierre del contacto *A* activa la alarma que extrae 2 A de la batería. El cierre del contacto *C* activa el circuito de iluminación de la casa. El cierre del contacto *B* bloquea el relevador y lo mantiene energizado aun cuando el intruso cierre la puerta o ventana por donde entró. Si no fuera por el contacto *B* dispuesto en paralelo con los interruptores de detección, la alarma y las luces se apagarían en cuanto la ventana o puerta se cerrara tras el intruso.

Los contactos del relevador no están físicamente lejos en relación con la bobina como se ve en el diagrama. El diagrama se trazó así por claridad funcional. Todo el relevador está alojado en el



▲ **FIGURA 10–40**

Sistema simplificado de una alarma contra robo.



▲ FIGURA 10–41

Relevador tripolar de doble vía.

paquete que muestra la figura 10-41. También se ilustra el diagrama de clavijas y el diagrama interno del relevador.

Interconexiones de sistema

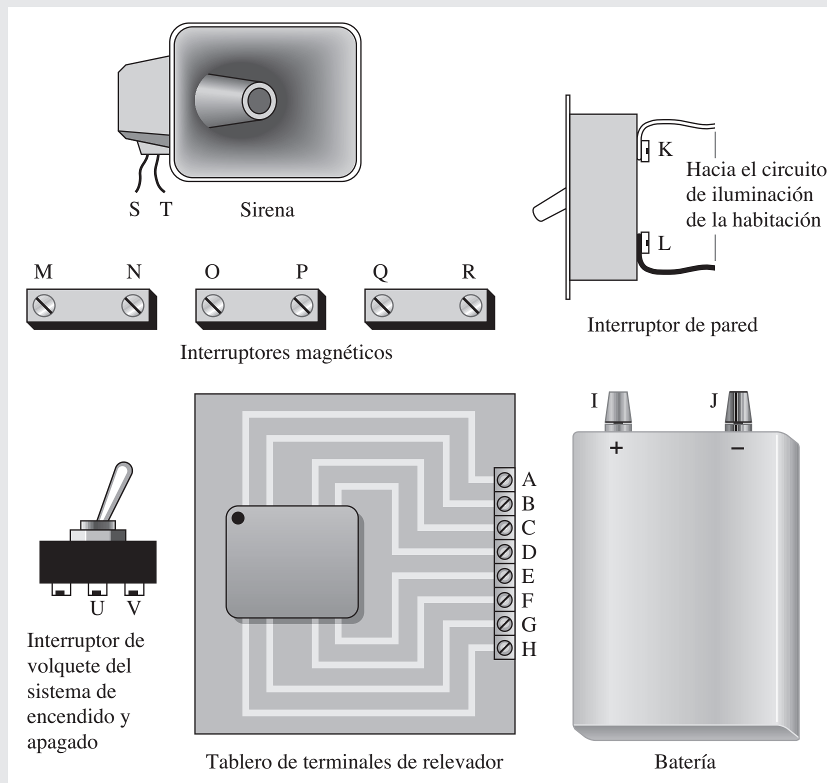
◆ Elabore un diagrama de bloques y una lista de conexiones punto con punto para interconectar los componentes que aparecen en la figura 10-42 y crear el sistema de alarma mostrado en el diagrama de la figura 10-40. Los puntos de conexión entre los componentes se indican con letras.

Un procedimiento de prueba

◆ Desarrolle un procedimiento detallado paso por paso para verificar el sistema de alarma contra robo completamente alambrado.

Repaso

1. ¿Cuál es el propósito de los interruptores de detección?
2. ¿Cuál es el propósito del contacto *B* localizado en el relevador de la figura 10-40?



▲ FIGURA 10–42

Disposición de los componentes de un sistema de alarma contra robo.

RESUMEN

- Los polos magnéticos desiguales se atraen entre sí y los polos iguales se repelen uno a otro.
- Los materiales que pueden ser magnetizados se llaman ferromagnéticos.
- Cuando hay corriente a través de un conductor, se produce un campo electromagnético alrededor del conductor.
- Se puede utilizar la regla de la mano derecha para establecer la dirección de las líneas de fuerza electromagnéticas presentes alrededor de un conductor.
- Un electroimán es básicamente una bobina de alambre alrededor de un núcleo magnético.
- Cuando un conductor se mueve adentro de un campo magnético, o cuando un campo magnético se mueve con respecto a un conductor, se induce un voltaje entre los extremos del conductor.
- Mientras más rápido es el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético, más grande es el voltaje inducido.
- La tabla 10-2 resume las cantidades y unidades magnéticas.

▶ TABLA 10–2

SÍMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD SI
B	Densidad de flujo magnético	Tesla (T)
ϕ	Flujo magnético	Weber (Wb)
μ	Permeabilidad	Webers/ampere-vuelta · metro (Wb/Av · m)
$\mathcal{R}$	Reluctancia	Ampere-vueltas/weber (Av/Wb)
F_m	Fuerza magnetomotriz (fmm)	Ampere-vuelta (Av)
H	Intensidad de campo magnético	Ampere-vueltas/metro (Av/m)

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas que aparecen en el capítulo se definen en el glosario incluido al final del libro.

Altavoz Dispositivo electromagnético que convierte señales eléctricas en ondas sonoras.

Ampere-vuelta (At) Es la corriente que hay en una sola espira (vuelta) de alambre.

Campo electromagnético Formación de un grupo de líneas de fuerza magnéticas que rodean a un conductor y son creadas por la corriente eléctrica que recorre el conductor.

Campo magnético Campo de fuerza que irradia desde el polo norte hasta el polo sur de un imán.

Corriente inducida (i_{ind}) Una corriente que se induce en un conductor cuando éste se mueve por un campo magnético.

Electromagnetismo Es la producción de un campo magnético por la corriente que recorre un conductor.

Flujo magnético Está constituido por las líneas de fuerza presentes entre los polos norte y sur de un imán permanente o de un electroimán.

Fuerza magnetomotriz (fmm) Es la causa de un campo magnético medida en ampere-vueltas.

Histéresis Característica de un material magnético por la cual un cambio en la magnetización retrasa la aplicación de la intensidad del flujo magnético.

Inducción electromagnética Fenómeno o proceso mediante el cual se produce un voltaje en un conductor cuando existe movimiento relativo entre el conductor y un campo magnético o electromagnético.

Ley de Faraday Ley que establece que el voltaje inducido en una bobina de alambre es igual al número de vueltas que tenga la bobina multiplicado por la razón de cambio del flujo magnético.

Ley de Lenz Ley que establece que cuando cambia la corriente que circula a través de una bobina, la polaridad del voltaje inducido creado por el campo magnético cambiante es tal que siempre se opone al cambio de corriente que lo provocó. La corriente no puede cambiar instantáneamente.

Líneas de fuerza Líneas de flujo magnéticas presentes en un campo magnético que irradian desde el polo norte hasta el polo sur.

Permeabilidad Medida de la facilidad con la cual un campo magnético puede ser establecido en un material.

Relevador Dispositivo mecánico que se controla electromagnéticamente y en el cual una corriente magnetizante abre y cierra contactos.

Reluctancia Es la oposición al establecimiento de un campo magnético en un material.

Retentividad Capacidad de un material, una vez que se magnetiza, de mantener un estado magnetizado sin la presencia de una fuerza magnetizante.

Solenoide Dispositivo controlado electromagnéticamente, en el cual el movimiento mecánico de una flecha o macho de imán es activado por una corriente magnetizante.

Tesla (T) Unidad SI de densidad de flujo magnético.

Voltaje inducido (v_{ind}) Es el voltaje producido como resultado de un campo magnético cambiante.

Weber (Wb) Unidad SI de flujo magnético, la cual representa 10^8 líneas.

FÓRMULAS

10–1	$B = \frac{\phi}{A}$	Densidad de flujo magnético
10–2	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$	Permeabilidad relativa
10–3	$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}$	Reluctancia
10–4	$F_m = NI$	Fuerza magnetomotriz
10–5	$\phi = \frac{F_m}{\mathcal{R}}$	Flujo magnético
10–6	$H = \frac{F_m}{l}$	Intensidad de flujo magnético
10–7	$v_{ind} = Blv$	Voltaje inducido en un conductor en movimiento
10–8	$v_{ind} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$	Ley de Faraday

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Cuando los polos sur de dos imanes se acercan entre sí, habrá
(a) una fuerza de atracción **(b)** una fuerza de repulsión
(c) una fuerza dirigida hacia arriba **(d)** ninguna fuerza

2. Un campo magnético se compone de
(a) cargas positivas y negativas **(b)** dominios magnéticos
(c) líneas de flujo **(d)** polos magnéticos

3. La dirección de un campo magnético es
(a) del polo norte al polo sur **(b)** del polo sur al polo norte
(c) de adentro hacia fuera del imán **(d)** de la parte anterior a la parte posterior

4. La reluctancia en un circuito magnético es análoga a
(a) el voltaje en un circuito eléctrico **(b)** la corriente en un circuito eléctrico
(c) la potencia en un circuito eléctrico **(d)** la resistencia en un circuito eléctrico

5. La unidad de flujo magnético es el
(a) tesla **(b)** weber **(c)** ampere-vuelta **(d)** ampere-vueltas/weber

6. La unidad de fuerza magnetomotriz es el
(a) tesla **(b)** weber **(c)** ampere-vuelta **(d)** ampere-vueltas/weber

7. La unidad de densidad de flujo es el
(a) tesla **(b)** weber **(c)** ampere-vuelta **(d)** electrón-volt

8. La activación electromagnética de una flecha movible es la base de los
(a) relevadores **(b)** cortacircuitos **(c)** interruptores magnéticos **(d)** solenoides

9. Cuando una corriente recorre un hilo colocado en un campo magnético,
(a) el hilo se sobrecalentará **(b)** el hilo se magnetizará
(c) una fuerza es ejercida en el hilo **(d)** el campo magnético se cancelará

10. Una bobina de alambre conductor se coloca en un campo magnético cambiante. Si el número de vueltas en la bobina se incrementa, el voltaje inducido en la bobina
(a) permanecerá igual **(b)** disminuirá **(c)** aumentará **(d)** será excesivo

11. Si un conductor se mueve con movimiento alternativo a velocidad constante en un campo magnético constante, el voltaje inducido en el conductor
(a) permanecerá constante **(b)** invertirá su polaridad **(c)** se reducirá **(d)** aumentará

12. En el sensor de posición de cigüeñal mostrado en la figura 10-33, el voltaje inducido en la bobina es provocado por
(a) la corriente en la bobina
(b) la rotación del disco de acero
(c) un diente que atraviesa el campo magnético
(d) la aceleración en la velocidad de rotación del disco de acero

PROBLEMAS

Un asterisco (*) señala los problemas más difíciles.
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 10–1 El campo magnético

1. El área de sección transversal de un campo magnético se incrementa, pero el flujo no cambia. ¿La densidad de flujo aumenta o disminuye?

2. En cierto campo magnético, el área de sección transversal es de 0.5 m^2 y el flujo es de 1500 μWb. ¿Cuál es la densidad de flujo?

3. ¿Cuál es el flujo en un material magnético cuando la densidad de flujo es de 2500×10^{-6} T y el área de sección transversal mide 150 cm^2?

4. En un lugar dado, suponga que el campo magnético terrestre es de 0.6 gauss. Exprese esta densidad de flujo en teslas.

5. Un imán permanente muy fuerte tiene un campo magnético de 100,000 μT. Exprese esta densidad de flujo en gauss.

SECCIÓN 10–2 Electromagnetismo

6. ¿Qué le sucede a la aguja de la brújula mostrada en la figura 10-9 cuando la corriente que circula a través del conductor se invierte?

7. ¿Cuál es la permeabilidad relativa de un material ferromagnético cuya permeabilidad absoluta es de 750×10^{-6} Wb/At·m?

8. Determine la reluctancia de un material con longitud de 0.28 m y área de sección transversal de 0.08 m^2 si la permeabilidad absoluta es de 150×10^{-7} Wb/At · m.

9. ¿Cuál es la fuerza magnetomotriz en una bobina de 50 vueltas de hilo cuando hay 3 A de corriente a través de él?

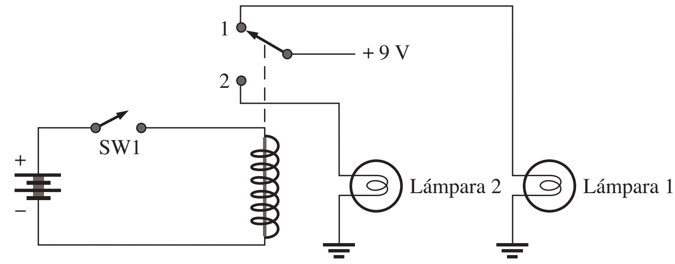
SECCIÓN 10–3 Dispositivos electromagnéticos

10. De manera característica, cuando se activa un solenoide, ¿se extiende o retrae el émbolo de imán?

11. **(a)** ¿Qué fuerza mueve el émbolo de imán cuando se activa un solenoide?
(b) ¿Qué fuerza hace que el émbolo de imán regrese a su posición de reposo?

12. Explique la secuencia de los eventos mostrados en el circuito de la figura 10-43 comenzando cuando el interruptor 1 (SW1) se cierra.

13. ¿Qué ocasiona que la aguja instalada en un movimiento de d'Arsonval se deflexione cuando circula corriente a través de la bobina?



▲ FIGURA 10–43

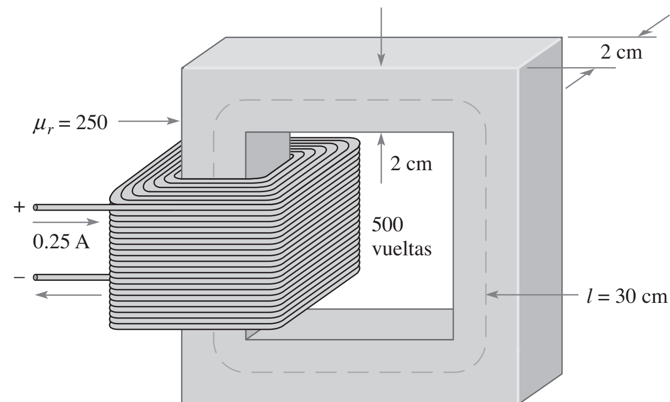
SECCIÓN 10–4 Histéresis magnética

14. ¿Cuál es la fuerza magnetizante en el problema 9 si la longitud del núcleo es de 0.2 m?

15. ¿Cómo se puede cambiar la densidad de flujo en la figura 10-44 sin alterar las características físicas del núcleo?

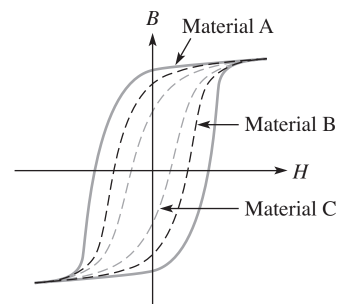
16. En la figura 10-44, hay 500 vueltas. Determine

(a) H **(b)** ϕ **(c)** B



▲ FIGURA 10–44

17. Determine a partir de las curvas de histéresis mostradas en la figura 10-45 qué material tiene más retentividad.



▲ FIGURA 10–45

SECCIÓN 10–5 Inducción electromagnética

18. De acuerdo con la ley de Faraday, ¿qué le sucede al voltaje inducido en una bobina dada si la razón de cambio del flujo magnético se duplica?
19. ¿Cuáles son los tres factores que determinan el voltaje en un conductor que se mueve en dirección perpendicular al campo magnético?
20. Un campo magnético cambia a razón de 3500×10^{-3} Wb/s. ¿Cuánto voltaje se induce en una bobina de 500 vueltas colocada en el campo magnético?
21. ¿Cómo complementa la ley de Lenz a la ley de Faraday?

SECCIÓN 10–6 Aplicaciones de la inducción electromagnética

22. En la figura 10-33, ¿por qué no se induce voltaje cuando el disco no está girando?
23. Explique el propósito del conmutador y de las escobillas en la figura 10-35.
* 24. Un generador de cd básico de una espira gira a 60 rev/s. ¿Cuántas veces cada segundo llega el voltaje de cd de salida a su pico (alcanza un máximo)?
* 25. Suponga que se agrega otra espira, a 90 grados de la primera, al generador de cd del problema 24. Trace una gráfica del voltaje contra el tiempo para mostrar cómo aparece el voltaje de salida. Sea de 10 V el voltaje máximo.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 10–1 El campo magnético

1. Los polos norte se repelen.
2. El flujo magnético es el grupo de líneas de fuerza que forman un campo magnético.
3. $B = \phi/A = 900\ \mu\text{T}$

SECCIÓN 10–2 Electromagnetismo

1. El electromagnetismo se produce por una corriente que recorre un conductor. Existe un campo electromagnético sólo cuando hay corriente. Existe un campo magnético independientemente de la corriente.
2. Cuando se invierte la corriente, la dirección del campo magnético también se invierte.
3. El flujo (ϕ) es igual a la fuerza magnetomotriz (F_m) dividida entre la reluctancia ($\mathcal{R}$).
4. Flujo: corriente, fmm: voltaje, reluctancia: resistencia.

SECCIÓN 10–3 Dispositivos electromagnéticos

1. Un solenoide produce sólo movimiento. Un relevador cierra un contacto eléctrico.
2. La parte móvil de un solenoide es el émbolo de imán.
3. La parte móvil de un relevador es la armadura.
4. El movimiento de d'Arsonval se basa en la interacción de campos magnéticos.

SECCIÓN 10–4 Histéresis magnética

1. Un incremento de la corriente aumenta la densidad de flujo.
2. Retentividad es la capacidad de un material de permanecer magnetizado después de que la fuerza magnetizante deja de actuar.
3. Las cabezas no deben permanecer magnetizadas después de que la fuerza magnetizante deja de actuar, pero las cintas sí.

SECCIÓN 10–5 Inducción electromagnética

1. Se induce voltaje cero.
2. El voltaje inducido se incrementa.
3. Se ejerce una fuerza en el conductor cuando existe corriente.

SECCIÓN 10–6 Aplicaciones de la inducción electromagnética

1. Se induce voltaje cero en el entrehierro.

2. Una rotación más rápida incrementa el voltaje inducido.

Una aplicación de circuito

1. Cuando se cierran los interruptores de detección, indican una intrusión a través de una ventana o puerta.

2. El contacto *B* bloquea el relevador y lo mantiene energizado cuando se detecta una intrusión.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

10–1 La densidad de flujo disminuirá.

10–2 31.0 T

10–3 La reluctancia se reduce a 12.8×10^6 At/Wb.

10–4 1.66×10^5 At/Wb

10–5 7.2 mWb

10–6 **(a)** $F_m = 42.5$ At

(b) $\mathcal{R} = 85 \times 10^3$ At/Wb

10–7 12.5 mV

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (c) **3.** (a) **4.** (d) **5.** (b) **6.** (c) **7.** (a) **8.** (d)

9. (c) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (c)

11 INTRODUCCIÓN A LA CORRIENTE Y AL VOLTAJE ALTERNOS

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Identificar una forma de onda sinusoidal y medir sus características
- Describir cómo se generan las ondas seno
- Determinar los diversos valores de voltaje y corriente de una onda seno
- Describir las relaciones angulares de una onda seno
- Analizar matemáticamente una forma de onda sinusoidal
- Utilizar un fasor para representar una onda seno
- Aplicar las leyes de circuito básicas a circuitos de ca resistivos
- Determinar voltajes totales que tienen tanto componentes de ca como de cd
- Identificar las características de formas de onda no sinusoidales básicas
- Utilizar un osciloscopio para medir formas de onda

TÉRMINOS CLAVE

- Amplitud
- Ancho de pulso (t_W)
- Armónicos
- Ciclo
- Ciclo de trabajo
- Fase
- Fasor
- Forma de onda
- Frecuencia (f)
- Frecuencia fundamental
- Generador de función
- Grado
- Hertz (Hz)
- Onda seno
- Oscilador
- Osciloscopio
- Periódico
- Periodo (T)
- Pulso
- Radián
- Rampa
- Tiempo de caída (t_f)
- Tiempo de subida (t_r)
- Valor instantáneo
- Valor pico
- Valor pico a pico
- Valor promedio
- Valor rms
- Velocidad angular

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, usted aprenderá cómo se miden señales de voltaje en un receptor de AM con un osciloscopio.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En los capítulos precedentes se estudiaron los circuitos resistivos con corrientes y voltajes de cd. Este capítulo proporciona una introducción al análisis de circuitos de ca en el cual se estudian las señales eléctricas que varían con el tiempo, en particular la onda seno. Una señal eléctrica es un voltaje o una corriente que cambian de manera consistente con el tiempo. En otras palabras, el voltaje o la corriente fluctúan de acuerdo con cierto patrón llamado forma de onda.

Un voltaje alterno es uno que cambia de polaridad con cierta rapidez. La forma de onda sinusoidal (onda seno) es el tipo más común y fundamental porque todos los demás tipos de formas de onda repetitivas pueden ser descompuestos en ondas seno compuestas. La onda seno es un tipo periódico de forma de onda que se repite a intervalos fijos.

Se pone un énfasis especial en la forma de onda sinusoidal (onda seno) debido a su importancia fundamental en el análisis de circuitos de ca. También se introducen otras formas de onda, incluidas la de pulso, la triangular, y la de diente de sierra. Se presenta el uso del osciloscopio para visualizar y medir formas de onda. Se examina el uso de fasores para representar ondas seno.

11–1 LA FORMA DE ONDA SINUSOIDAL

La forma de onda sinusoidal u *onda seno* es el tipo fundamental de corriente alterna (ca) y voltaje alterno. También se conoce como onda sinusoidal o, simplemente, sinusoide. El servicio eléctrico provisto por la compañía de electricidad es en la forma de voltaje y corriente sinusoidales. Además, otros tipos de formas de **onda repetitivas** se componen de muchas ondas seno individuales llamadas armónicas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Identificar una forma de onda sinusoidal y medir sus características**
  - Determinar el periodo
  - Determinar la frecuencia
  - Relacionar el periodo con la frecuencia

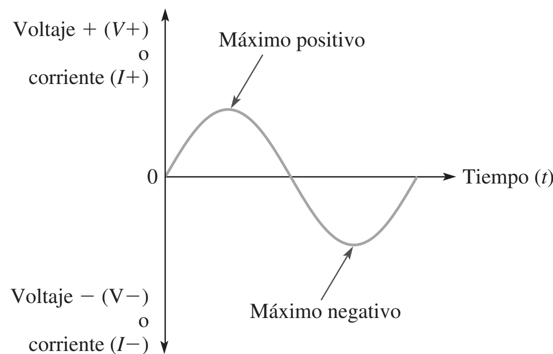
Dos tipos de fuentes producen voltajes sinusoidales: las máquinas eléctricas rotatorias (generadores de ca) y los circuitos osciladores electrónicos, los cuales se utilizan en instrumentos comúnmente conocidos como generadores de señales electrónicas. La figura 11-1 muestra el símbolo utilizado para representar cualquier fuente de voltaje sinusoidal.



▲ **FIGURA 11–1**

Símbolo para una fuente de voltaje sinusoidal.

La figura 11-2 es una gráfica que muestra la forma general de una **onda seno**, la cual puede ser o una corriente alterna o un voltaje alterno. El voltaje (o la corriente) se muestra en el eje vertical y el tiempo (*t*) en el eje horizontal. Advierta cómo varía el voltaje (o la corriente) con el tiempo. Comenzando en cero, el voltaje (o la corriente) se incrementa hasta un máximo positivo (pico), regresa a cero, y luego se incrementa hasta un máximo negativo (pico) antes de regresar otra vez a cero, y así completa un ciclo.



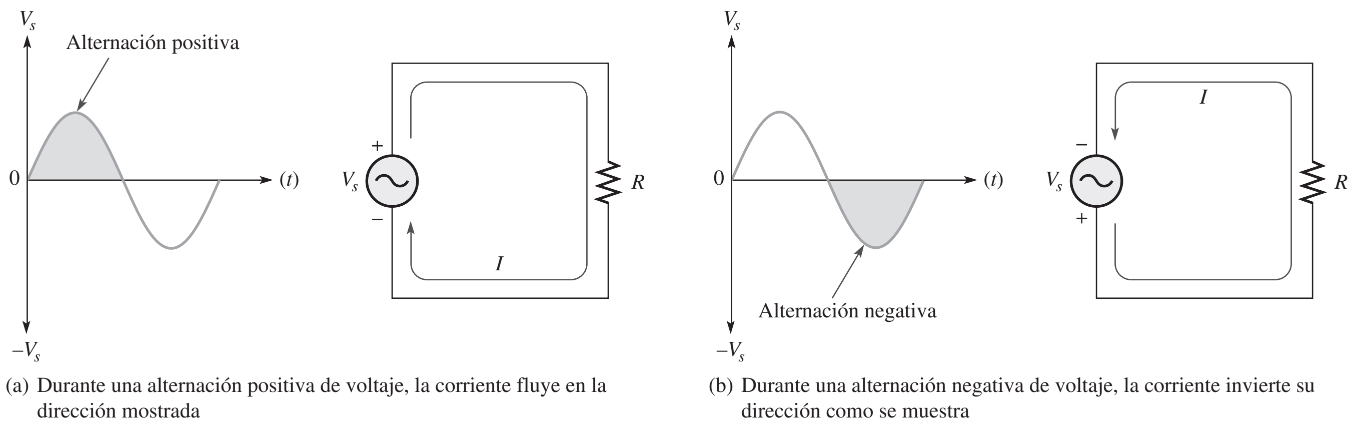
▲ **FIGURA 11–2**

Gráfica de un ciclo de una onda seno.

Polaridad de una onda seno

Como ya se mencionó, una onda seno cambia de polaridad en su valor cero; esto es, alterna entre valores positivos y negativos. Cuando se aplica una fuente de voltaje sinusoidal (V_S) a un circuito resistivo, como en la figura 11-3, se produce una corriente sinusoidal. Cuando el voltaje cambia de polaridad la corriente, en correspondencia, cambia de dirección como se indica.

Durante la alternación positiva del voltaje aplicado, V_s, la corriente fluye en la dirección mostrada en la figura 11-3(a). Durante una alternación negativa del voltaje aplicado, la corriente fluye en la dirección opuesta, según muestra la figura 11-3(b). Las alternaciones positivas y negativas combinadas forman un **ciclo** de una onda seno.



(a) Durante una alternación positiva de voltaje, la corriente fluye en la dirección mostrada

(b) Durante una alternación negativa de voltaje, la corriente invierte su dirección como se muestra

▲ **FIGURA 11–3**

Corriente y voltaje alternantes.

Periodo de una onda seno

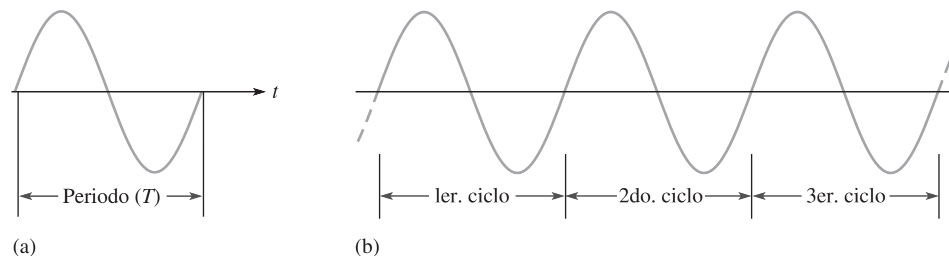
Una onda seno varía con el tiempo (t) de una manera que es definible.

El tiempo requerido para que una onda seno complete todo un ciclo se llama periodo (T)

La figura 11-4(a) ilustra el periodo de una onda seno. De modo característico, una onda seno continúa repitiéndose a sí misma en ciclos idénticos, según muestra la figura 11-4(b). Como todos los ciclos de una onda seno repetitiva son iguales, el periodo siempre es un valor fijo para una onda seno dada. El periodo de una onda seno se puede medir desde su cruce por cero hasta el siguiente cruce por cero correspondiente, como indica la figura 11-4(a). En un ciclo dado, el periodo también puede medirse desde cualquier pico hasta el correspondiente pico alcanzado en el siguiente ciclo.

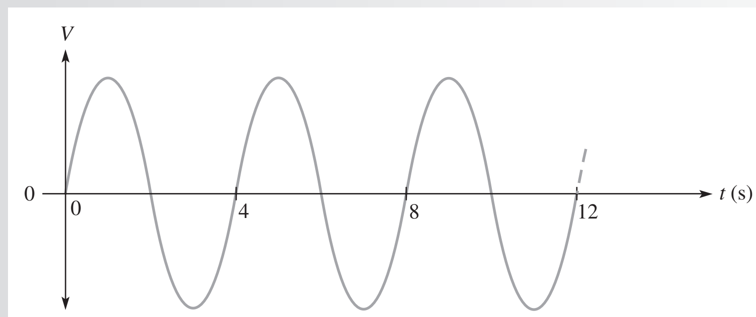
▶ **FIGURA 11–4**

El periodo de una onda seno es el mismo para cada ciclo.



EJEMPLO 11–1 ¿Cuál es el periodo de la onda seno mostrada en la figura 11-5?

▶ **FIGURA 11–5**



Solución Como se muestra en la figura 11-5, se requieren cuatro segundos (4 s) para completar cada ciclo. Por consiguiente, el periodo es de 4 s.

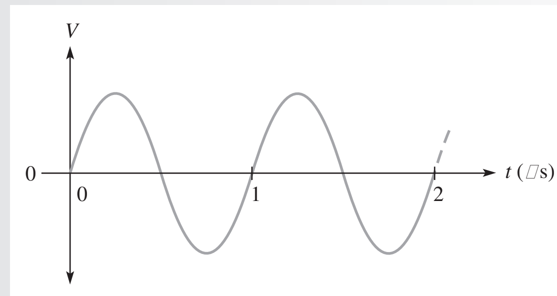
$$T = \mathbf{4\,s}$$

*Problema relacionado** ¿Cúal es el periodo si la onda seno realiza 5 ciclos en 12 s?

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 11–2 Explique tres formas posibles de medir el periodo de la onda seno mostrada en la figura 11-6. ¿Cuántos ciclos se muestran?

▶ FIGURA 11–6



Solución

Método 1: El periodo se mide a partir de un cruce por cero al cruce por cero correspondiente en el siguiente ciclo (la pendiente debe ser la misma en los cruces por cero correspondientes).

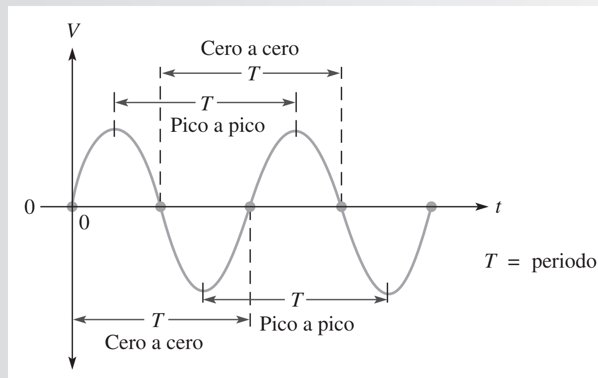
Método 2: El periodo se mide desde el pico positivo en un ciclo hasta el pico positivo en el siguiente ciclo.

Método 3: El periodo se mide desde el pico negativo en un ciclo hasta el pico negativo en el siguiente ciclo.

Estas mediciones se indican en la figura 11-7, donde se muestran **dos ciclos de la onda seno**. Tenga en cuenta que se obtiene el mismo valor para el periodo sin importar qué puntos correspondientes se utilicen en la forma de onda.

▶ FIGURA 11–7

Medición del periodo de una onda seno.



Problema relacionado Si ocurre un pico positivo en 1 ms y el siguiente ocurre en 2.5 ms, ¿cuál es el periodo?

BIOGRAFÍA



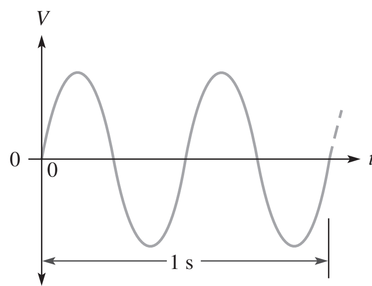
Heinrich Rudolf Hertz 1857–1894

Hertz, un físico alemán, fue el primero en transmitir y recibir ondas electromagnéticas (radio). Produjo ondas electromagnéticas en el laboratorio y midió sus parámetros. Hertz también comprobó que la naturaleza de la reflexión y refracción de las ondas electromagnéticas eran las mismas que las de la luz. La unidad de frecuencia fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Deutsches Museum, cortesía de AIP Emilio Segrè Visual Archives).

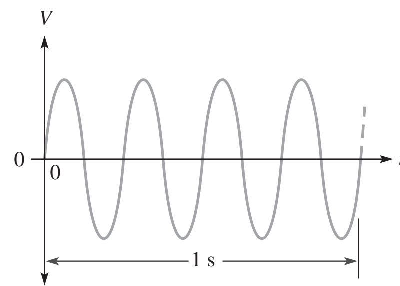
Frecuencia de una onda seno

La frecuencia (*f*) es el número de ciclos que una onda seno completa en un segundo.

Mientras más ciclos se completan en un segundo, más alta es la frecuencia. La frecuencia (f) se mide en unidades de hertz. Un **hertz (Hz)** equivale a un ciclo por segundo; 60 Hz son 60 ciclos por segundo, por ejemplo. La figura 11-8 muestra dos ondas seno. En la parte (a), la onda seno completa dos ciclos en un segundo. En la parte (b), completa cuatro ciclos en un segundo. Por consiguiente, la onda seno de la parte (b) tiene dos veces la frecuencia de la onda mostrada en la parte (a).



(a) Baja frecuencia: menos ciclos por segundo



(b) Alta frecuencia: más ciclos por segundo

▲ FIGURA 11–8

Ilustración de la frecuencia.

Relación de frecuencia y periodo

Las fórmulas para calcular la relación entre frecuencia (f) y periodo (T) son las siguientes:

Ecuación 11–1

$$f = \frac{1}{T}$$

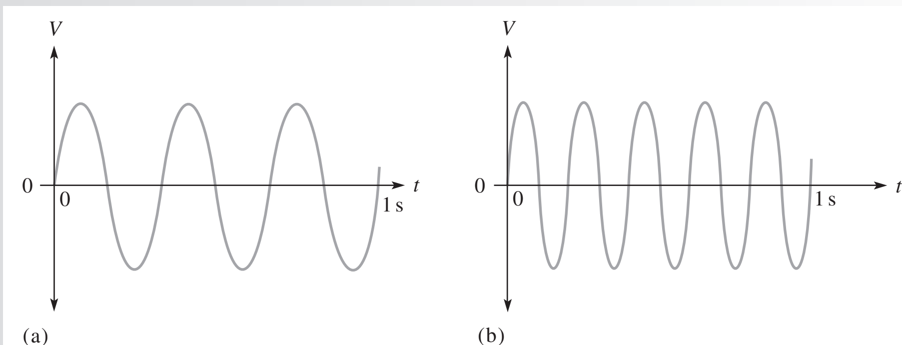
Ecuación 11–2

$$T = \frac{1}{f}$$

Existe una relación recíproca entre f y T. Conociendo una, se puede calcular la otra mediante la tecla x^{-1} o $1/x$ de una calculadora. Esta relación inversa tiene sentido porque una onda seno con un periodo más largo realiza menos ciclos en un segundo que una con un periodo más corto.

EJEMPLO 11–3 ¿Cuál onda seno de las mostradas en la figura 11-9 tiene la frecuencia más alta? Determine la frecuencia y el periodo de ambas formas de onda.

► FIGURA 11–9



Solución La onda seno de la figura 11-9(b) tiene la frecuencia más alta porque completa más ciclos en 1 s que la onda seno de la parte (a).

En la figura 11-9(a), se completan tres ciclos en 1 s; por consiguiente,

$$f = \mathbf{3\ Hz}$$

Un ciclo requiere de 0.333 s (un tercio de segundo), por lo que el periodo es

$$T = 0.333\ \text{s} = \mathbf{333\ ms}$$

En la figura 11-9(b), se completan cinco ciclos en 1 s; por consiguiente,

$$f = \mathbf{5\ Hz}$$

Un ciclo requiere de 0.2 s (un quinto de segundo), de modo que el periodo es

$$T = 0.2\ \text{s} = \mathbf{200\ ms}$$

Problema relacionado Si el tiempo entre los picos negativos de una onda seno es de 50 μs, ¿cuál es la frecuencia?

EJEMPLO 11–4 El periodo de cierta onda seno es de 10 ms. ¿Cuál es la frecuencia?

Solución Use la ecuación 11-1.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\ \text{ms}} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}\ \text{s}} = \mathbf{100\ Hz}$$

Problema relacionado Cierta onda seno realiza cuatro ciclos en 20 ms. ¿Cuál es la frecuencia?

EJEMPLO 11–5 La frecuencia de una onda seno es de 60 Hz. ¿Cuál es el periodo?

Solución Use la ecuación 11-2,

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60\ \text{Hz}} = \mathbf{16.7\ ms}$$

Problema relacionado Si T = 15 μs, ¿cuál es f?

REPASO DE LA SECCIÓN 11-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Describa un ciclo de una onda seno.
2. ¿En qué punto cambia de polaridad una onda seno?
3. ¿Cuántos puntos máximos tiene una onda seno durante un ciclo?
4. ¿Cómo se mide el periodo de una onda seno?
5. Defina el término *frecuencia* y enuncie su unidad.
6. Determine f cuando $T = 5\ \mu$s.
7. Determine T cuando $f = 120$ Hz.

11–2 Fuentes de voltaje sinusoidal

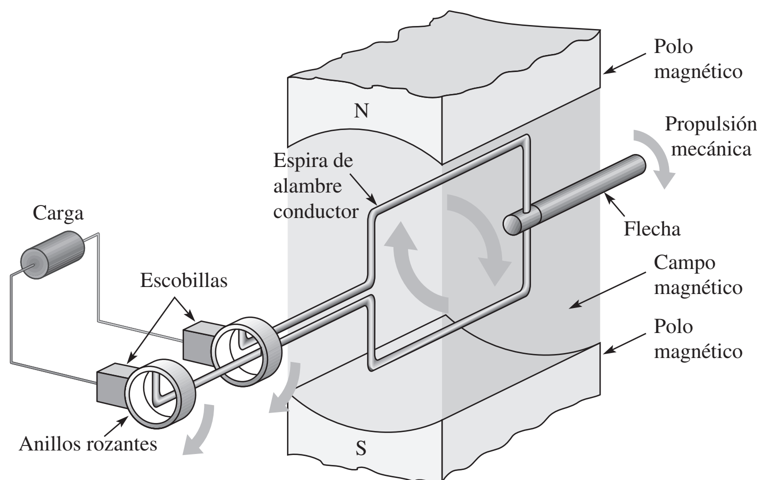
Dos métodos básicos de generar voltajes sinusoidales son: electromagnético y electrónico. Las ondas seno son producidas electromagnéticamente por generadores de ca y electrónicamente por circuitos osciladores.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir cómo se generan las ondas seno**
  - Examinar la operación básica de un generador de ca
  - Analizar los factores que afectan la frecuencia en generadores de ca
  - Analizar los factores que afectan el voltaje en generadores de ca

Un generador de CA

La figura 11-10 muestra un **generador** de ca extremadamente simple que consiste en una espira única de alambre conductor en un campo magnético permanente. Advierta que cada extremo de la espira de alambre conductor está conectado a un anillo conductor sólido distinto llamado *anillo rozante*. Un propulsor mecánico, tal como un motor, hace girar la flecha a la cual la espira de alambre conductor está conectada. Conforme la espira gira en el campo magnético entre los polos norte y sur, los anillos rozantes también giran y frotan contra las escobillas que conectan la espira a una carga externa. Compare este generador con el generador de cd básico mostrado en la figura 10-35, y observe la diferencia en las disposiciones de anillos y escobillas.

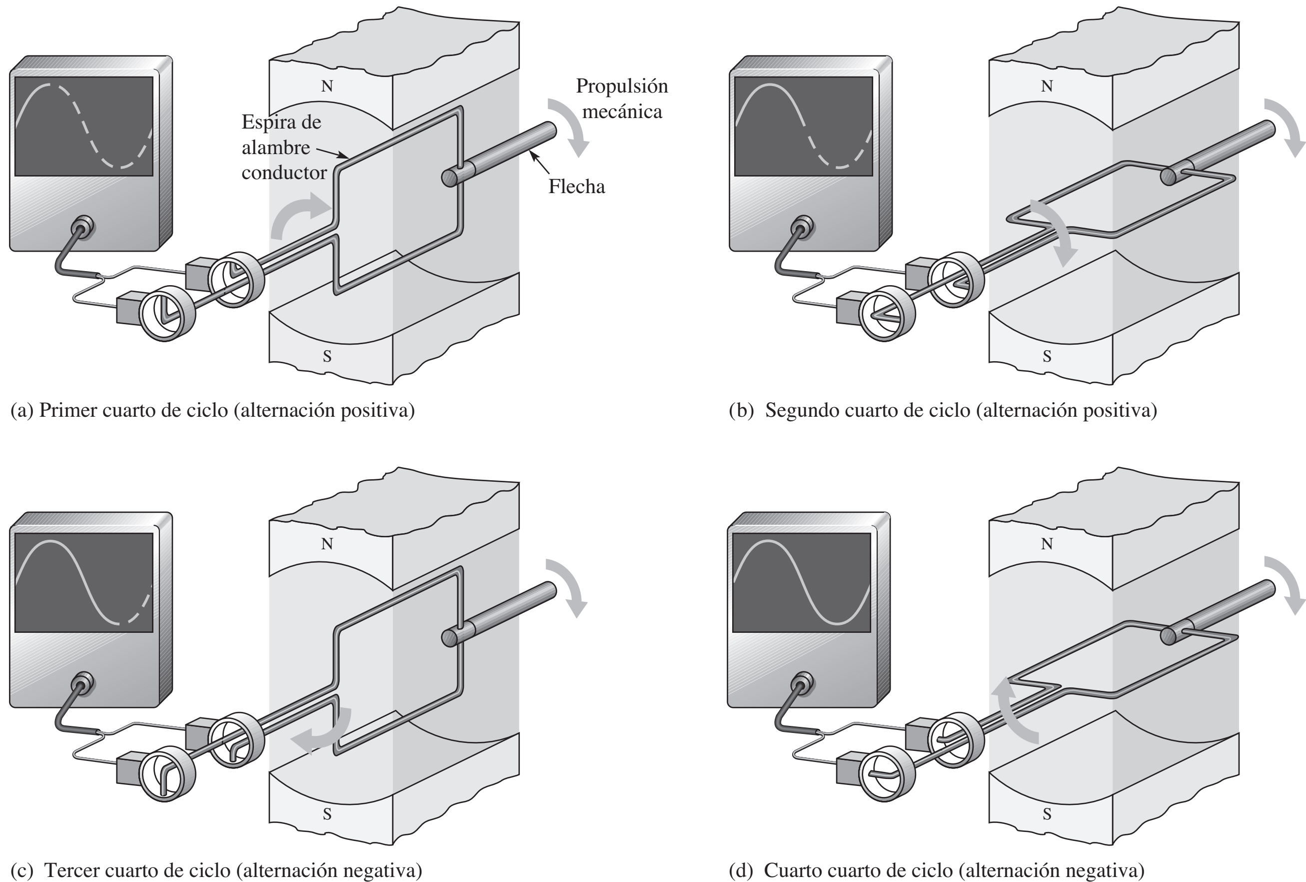


▶ **FIGURA 11–10**

Generador de ca simplificado.

Como se aprendió en el capítulo 10, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, se induce un voltaje. La figura 11-11 ilustra cómo es producido un voltaje sinusoidal por el generador de ca básico a medida que la espira gira. Se utiliza un osciloscopio para visualizar la forma de onda del voltaje.

Para comenzar, la figura 11-11(a) muestra la espira girando a través del primer cuarto de revolución. Va desde una posición horizontal instantánea, donde del voltaje inducido es de cero, hasta una posición vertical instantánea, donde el voltaje es máximo. En la posición horizontal, instantáneamente la espira se mueve en dirección paralela a las líneas de flujo, las cuales existen entre los polos norte (N) y sur (S) del imán. Por tanto, no se están cortando líneas y el voltaje es de cero. Conforme la espira realiza el primer cuarto de ciclo, atraviesa las líneas de flujo a velocidad cada vez más alta hasta que instantáneamente se mueve en dirección perpendicular a las líneas de flujo en la posición vertical y las atraviesa a máxima velocidad. Por tanto, el voltaje inducido se incrementa desde cero hasta un pico durante el cuarto de ciclo. Como indica la figura 11-11(a),



(a) Primer cuarto de ciclo (alternación positiva)

(b) Segundo cuarto de ciclo (alternación positiva)

(c) Tercer cuarto de ciclo (alternación negativa)

(d) Cuarto cuarto de ciclo (alternación negativa)

▲ **FIGURA 11–11**

Una revolución de la espira de alambre conductor genera un ciclo de voltaje sinusoidal.

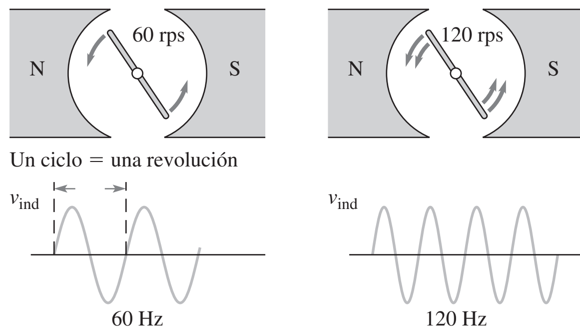
esta parte de la rotación produce el primer cuarto del ciclo de la onda seno a medida que el voltaje se incrementa desde cero hasta su máximo positivo.

La figura 11-11(b) muestra la espira completando la primera mitad de la revolución. Durante esta parte de la rotación, el voltaje disminuye desde su máximo positivo hasta cero conforme la velocidad a la cual la espira corta las líneas de flujo disminuye.

Durante la segunda mitad de la revolución, ilustrada en las figuras 11-11(c) y 11-11(d), la espira corta el campo magnético en la dirección opuesta, por lo que el voltaje producido tiene una polaridad opuesta a la del producido durante la primera mitad de la revolución. Después de una revolución completa de la espira, se ha producido un ciclo completo del voltaje sinusoidal. Conforme la espira continúa girando, se generan ciclos repetitivos de la onda seno.

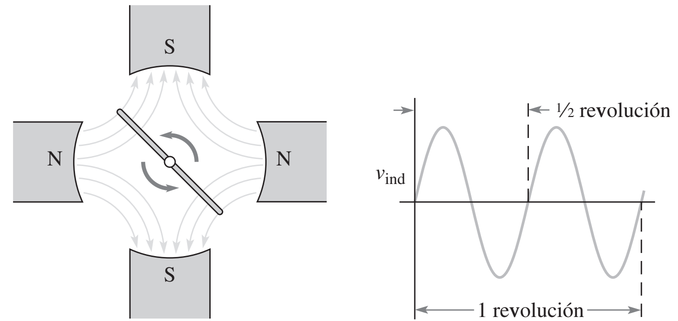
Frecuencia Se ha visto que en el generador de ca básico (también llamado *alternador*), una revolución del conductor a través del campo magnético produce un ciclo de voltaje sinusoidal inducido. Es obvio que la velocidad a la cual gira el conductor determina el tiempo requerido para completar un ciclo. Por ejemplo, si el conductor completa 60 revoluciones en un segundo (rps), el periodo de la onda resultante es de 1/60 s, correspondiente a una frecuencia de 60 Hz. Por tanto, mientras más rápido gira el conductor, más alta será la frecuencia resultante del voltaje inducido, como ilustra la figura 11-12.

Otra forma de lograr una alta frecuencia es incrementar el número de polos magnéticos. En el planteamiento previo, se utilizaron dos polos magnéticos para ilustrar el principio del generador de ca. Durante una revolución, el conductor pasa debajo de un polo norte y un polo sur, con lo que se produce un ciclo de una onda seno. Cuando se utilizan cuatro polos en lugar de dos, como indica la figura 11-13, se genera un ciclo durante una mitad de revolución. Esto duplica la frecuencia para la misma rapidez de rotación.



▲ **FIGURA 11–12**

En un generador de ca, la frecuencia es directamente proporcional a la rapidez de rotación de la espira de alambre conductor.



▲ **FIGURA 11–13**

Cuatro polos logran una frecuencia más alta que dos con las mismas rps.

La siguiente es una expresión para la frecuencia en función del número de pares de polos y el número de revoluciones por segundo (rps):

Ecuación 11–3

$$f = (\text{número de pares de polos})(\text{rps})$$

EJEMPLO 11–6 La rapidez de rotación de un generador de cuatro polos es de 100 rps. Determine la frecuencia del voltaje de salida.

Solución

$$f = (\text{número de pares de polos})(\text{rps}) = 2(100)(\text{rps}) = \mathbf{200\ Hz}$$

Problema relacionado Si la frecuencia de la salida de un generador de cuatro polos es de 60 Hz, ¿cuáles son las rps?

Amplitud del voltaje Recuerde por la ley de Faraday que el voltaje inducido en un conductor depende del número de vueltas (N) y de la rapidez de cambio con respecto al campo magnético. Por consiguiente, cuando la rapidez de rotación del conductor se incrementa, no sólo se incrementa la frecuencia del voltaje inducido, sino también la **amplitud**, la cual está a su valor máximo. Como el valor de la frecuencia normalmente es fijo, el método más práctico de incrementar la cantidad de voltaje inducido es aumentar el número de espiras de alambre conductor.

Generadores de señales electrónicas

El generador de señales es un instrumento que produce electrónicamente ondas utilizadas para probar y controlar circuitos y sistemas electrónicos. Existe una amplia variedad de generadores de señales, los cuales van desde instrumentos para usos especiales que producen sólo un tipo de forma de onda en un intervalo de frecuencia limitado, hasta instrumentos programables que producen una amplia variedad de frecuencias y formas de onda. Todos los generadores de señales constan básicamente de un **oscilador**, el cual es un circuito electrónico que produce ondas repetitivas. Todos los generadores disponen de controles para ajustar la amplitud y la frecuencia.

Generadores de funciones y generadores de formas de onda arbitrarias Un **generador de funciones** es un instrumento que produce más de un tipo de forma de onda. Produce formas de onda pulsantes así como también ondas seno y ondas triangulares. En la figura 11-14(a) se muestra un generador de funciones típico.

Se puede utilizar un generador de formas de onda arbitrarias para generar señales estándar como ondas seno, ondas triangulares y pulsos, así como también señales con diversas formas y características. Las formas de onda se definen con datos de entrada matemáticos o gráficos. En la figura 11-14(b) se muestra un generador de formas de onda arbitrarias típico.



(a) Ejemplos de generadores de funciones



(b) Generador de formas de onda arbitrarias típico

▲ FIGURA 11–14

Generadores de señales típicos. Copyright © Tektronix, Inc. Reproducidos con permiso.

REPASO DE LA SECCIÓN 11-2

1. ¿Cuáles son los métodos básicos que se utilizan para generar voltajes sinusoidales?
2. ¿Cómo se relacionan la rapidez de rotación y la frecuencia en un generador de ca?
3. ¿Qué es un oscilador?

11–3 VALORES SINUSOIDALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE

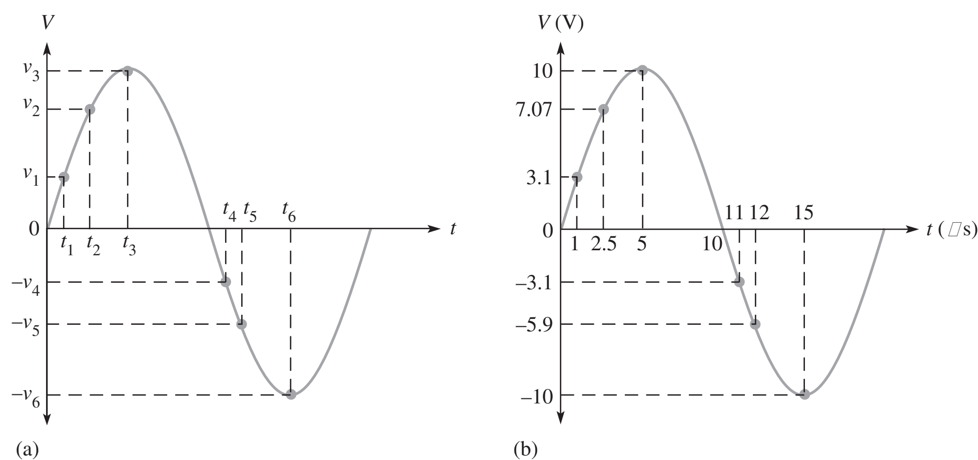
Cinco formas de expresar el valor de una onda seno en función de su magnitud de voltaje o de su magnitud de corriente son los valores instantáneos pico, pico a pico, rms, y promedio.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar los diversos valores de voltaje y corriente de una onda seno**
  - Determinar el valor instantáneo en cualquier punto
  - Determinar el valor pico
  - Determinar el valor pico a pico
  - Definir el término *rms*
  - Explicar por qué el valor promedio siempre es de cero en un ciclo completo
  - Determinar el valor promedio en medio ciclo

Valor instantáneo

La figura 11-15 ilustra que en cualquier instante en una onda seno, el voltaje (o la corriente) tiene un **valor instantáneo**. Este valor instantáneo es diferente en puntos diferentes situados por toda la curva. Los valores instantáneos son positivos durante la alternación positiva y negativos durante la alternación negativa. Los valores instantáneos de voltaje y corriente son simbolizados mediante las letras minúsculas v e i, respectivamente. La curva mostrada en la parte (a) de la figura 11-15 representa sólo voltaje, pero se aplica por igual a corriente cuando las letras v son reemplazadas con letras i. Un ejemplo de valores instantáneos se muestra en la parte (b) donde el voltaje instantáneo es de 3.1 V en el instante de 1 μs, de 7.07 V en el instante de 2.5 μs, de 10 V en el instante de 5 μs, de 0 V en el instante de 10 μs, de -3.1 V en el instante de 11 μs, y así sucesivamente.



▲ **FIGURA 11–15**

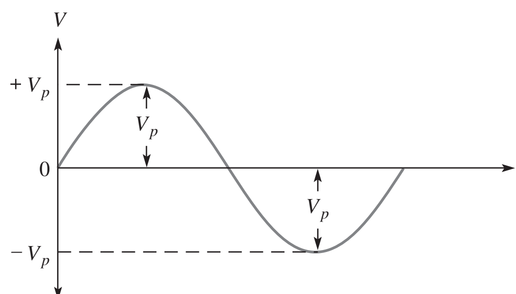
Valores instantáneos.

Valor pico

El **valor pico** de una onda seno es el valor de voltaje (o corriente) en el punto máximo (pico) positivo o negativo con respecto a cero. Como los valores pico positivos y negativos son iguales en **magnitud**, una onda seno se caracteriza por un solo valor pico. Esto se ilustra en la figura 11-16. Para una onda seno dada, el valor pico es constante y está representado por V_p o I_p.

▶ **FIGURA 11–16**

Valores pico.



Valor pico a pico

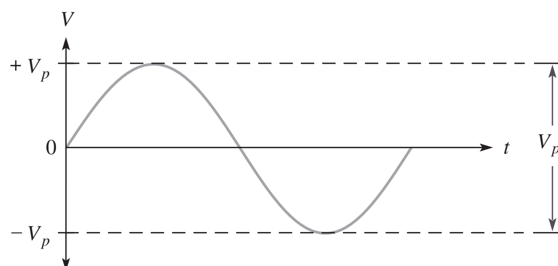
El **valor pico a pico** de una onda seno, como se muestra en la figura 11-17, es el voltaje o la corriente desde el pico positivo hasta el pico negativo. Siempre es dos veces el valor pico, tal como se expresa en las siguientes ecuaciones. Los valores de voltaje o de corriente pico a pico están representados por V_{pp} o I_{pp}.

Ecuación 11–4
$$V_{pp} = 2V_p$$

Ecuación 11–5
$$I_{pp} = 2I_p$$

▶ **FIGURA 11–17**

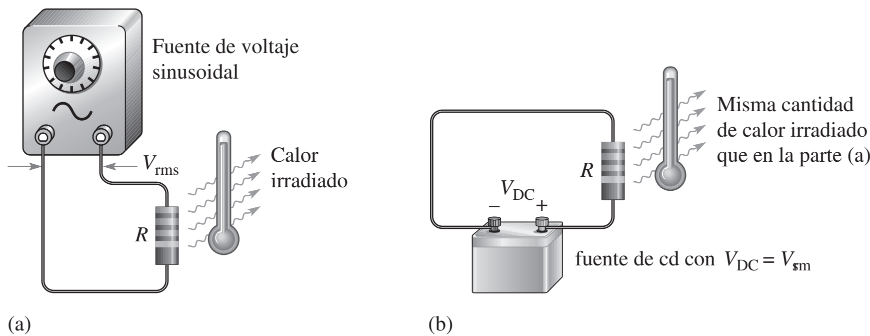
Valor pico a pico.



Valor RMS

El término *rms* proviene de las siglas de *root mean square*, y significa raíz cuadrada de la media de los cuadrados. La mayoría de los voltímetros muestran voltaje rms. Los 110 volts de una toma de corriente doméstica es un valor rms. El **valor rms**, conocido también como **valor efectivo**, de un voltaje sinusoidal es en realidad una medida del efecto de calentamiento de la onda seno. Por ejemplo, cuando se conecta un resistor entre las terminales de una fuente de voltaje (sinusoidal) de ca, como indica la figura 11-18(a), se genera cierta cantidad de calor por la potencia en el resistor. La figura 11-18(b) muestra el mismo resistor conectado entre las terminales de una fuente de voltaje de cd. El valor del voltaje de cd puede ajustarse de modo que el resistor disipe la misma cantidad de calor como cuando se conecta a la fuente de ca.

El valor rms de un voltaje sinusoidal es igual al voltaje de cd que produce la misma cantidad de calor en una resistencia que un voltaje sinusoidal.



▲ **FIGURA 11–18**

Cuando se produce la misma cantidad de calor en ambas configuraciones, el voltaje sinusoidal tiene un valor rms igual al voltaje de cd.

El valor pico de una onda seno puede convertirse en el valor rms correspondiente con las siguientes relaciones, derivadas en el apéndice B, para o voltaje o corriente:

$$V_{rms} = 0.707V_p \quad \textbf{Ecuación 11–6}$$

$$I_{rms} = 0.707I_p \quad \textbf{Ecuación 11–7}$$

Con estas fórmulas, también es posible determinar el valor pico si se conoce el valor rms,

$$V_p = \frac{V_{rms}}{0.707}$$

$$V_p = 1.414V_{rms} \quad \textbf{Ecuación 11–8}$$

Asimismo,

$$I_p = 1.414I_{rms} \quad \textbf{Ecuación 11–9}$$

Para obtener el valor pico a pico, simplemente se duplica el valor pico,

$$V_{pp} = 2.828V_{rms} \quad \textbf{Ecuación 11–10}$$

y

$$I_{pp} = 2.828I_{rms} \quad \textbf{Ecuación 11–11}$$

Valor promedio

El valor promedio de una onda tomado durante un ciclo completo siempre es cero porque los valores positivos (sobre el cruce por cero) neutralizan los valores negativos (debajo del cruce por cero).

Para que sea útil en ciertos propósitos, tales como tipos de medición de voltajes encontrados en fuentes de potencia, el valor promedio de una onda seno se define durante medio ciclo y no durante un ciclo completo. El **valor promedio** es el área total debajo de la curva de medio ciclo dividida entre la distancia en radianes de la curva a lo largo del eje horizontal. El resultado se deriva en el apéndice B y se expresa como sigue en función del valor pico para ondas seno tanto de voltaje como de corriente:

$$V_{prom} = \left(\frac{2}{\pi}\right)V_p$$

Ecuación 11–12

$$V_{prom} = 0.637V_p$$

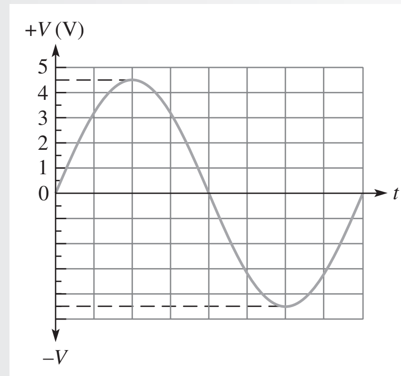
$$I_{prom} = \left(\frac{2}{\pi}\right)I_p$$

Ecuación 11–13

$$I_{prom} = 0.637I_p$$

EJEMPLO 11–7 Determine V_p, V_{pp}, V_{rms}, y el V_{prom} en medio ciclo para la onda seno de la figura 11-19.

▶ FIGURA 11–19



Solución $V_p = 4.5$ V se lee directamente en la gráfica. Con este valor, calcule los demás valores.

$$V_{pp} = 2V_p = 2(4.5\text{ V}) = \mathbf{9\ V}$$
$$V_{rms} = 0.707V_p = 0.707(4.5\text{ V}) = \mathbf{3.18\ V}$$
$$V_{prom} = 0.637V_p = 0.637(4.5\text{ V}) = \mathbf{2.87\ V}$$

Problema relacionado Si $V_p = 25$ V, determine V_{pp}, V_{rms}, y V_{prom} para una onda seno de voltaje.

REPASO DE LA SECCIÓN 11-3

1. Determine V_{pp} en cada caso cuando
   (a) $V_p = 1$ V (b) $V_{rms} = 1.414$ V (c) $V_{prom} = 3$ V
2. Determine V_{rms} en cada caso cuando
   (a) $V_p = 2.5$ V (b) $V_{pp} = 10$ V (c) $V_{prom} = 1.5$ V
3. Determine V_{prom} en medio ciclo en cada caso cuando
   (a) $V_p = 10$ V (b) $V_{rms} = 2.3$ V (c) $V_{pp} = 60$ V

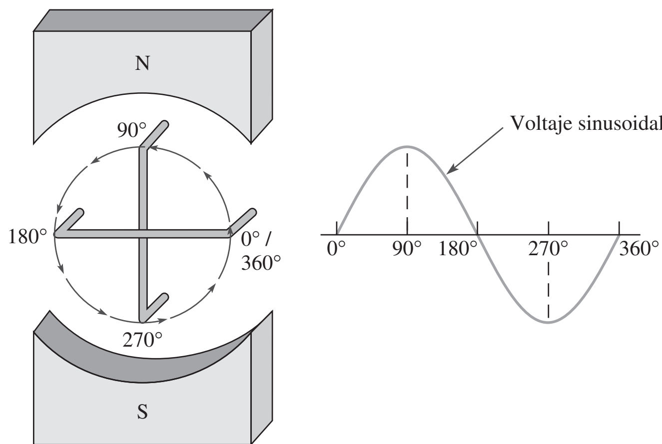
11–4 Medición angular de una onda seno

Como se ha visto, las ondas seno se miden a lo largo del eje horizontal con base en el tiempo; sin embargo, dado que el tiempo para completar medio ciclo o cualquier fracción de un ciclo depende de la frecuencia, a menudo resulta útil especificar puntos en la onda seno en función de una medición angular expresada en grados o radianes.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir las relaciones angulares de ondas seno**
  - Demostrar cómo se mide una onda seno en función de ángulos
  - Definir el término *radián*
  - Convertir radianes en grados
  - Determinar el ángulo de fase de una onda seno

Un generador de ca produce voltaje sinusoidal. Conforme los devanados del rotor del generador de ca realizan una rotación de 360°, la salida de voltaje resultante es un ciclo completo de una onda seno. Por tanto, la medición angular de una onda seno puede relacionarse con la rotación angular de un generador, como se muestra en la figura 11-20.



▲ FIGURA 11–20

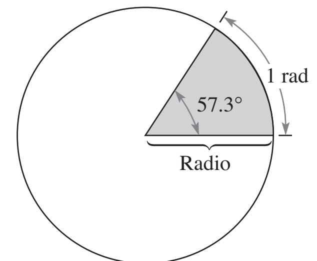
Relación de una onda seno al movimiento rotatorio de un generador de ca.

Medición angular

Un **grado** es una medida angular correspondiente a 1/360 de un círculo o una revolución completa. Un **radián** es la medición angular a lo largo de la circunferencia de un círculo que es igual al radio del círculo. Un radián (rad) equivale a 57.3°, como se ilustra en la figura 11-21. En una revolución de 360°, hay 2π radianes.

La letra griega π (pi) representa la relación de la circunferencia de cualquier círculo a su diámetro y tiene un valor constante de aproximadamente 3.1416.

Las calculadoras científicas tienen una función π de modo que el valor numérico real no tiene que ser ingresado.



▲ FIGURA 11–21

Medición angular que muestra la relación de radianes (rad) a grados (°).

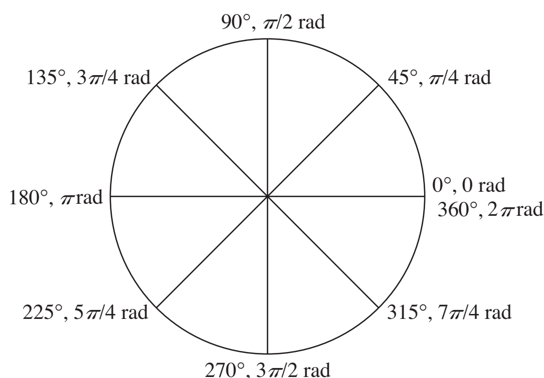
▶ TABLA 11–1

GRADOS (°)	RADIANES (RAD)
0	0
45	$\pi/4$
90	$\pi/2$
135	$3\pi/4$
180	π
225	$5\pi/4$
270	$3\pi/2$
315	$7\pi/4$
360	2π

La tabla 11-1 incluye varios valores de grados y los correspondientes valores en radianes. Estas mediciones angulares se ilustran en la figura 11-22.

▶ FIGURA 11–22

Mediciones angulares que comienzan en 0° y continúan en sentido contrario al de las manecillas del reloj.



Conversión de radianes a grados y viceversa

Los grados se pueden convertir a radianes.

Ecuación 11–14

$$\text{rad} = \left(\frac{\pi \text{ rad}}{180°}\right) \times \text{grados}$$

Asimismo, los radianes pueden convertirse en grados.

Ecuación 11–15

$$\text{grados} = \left(\frac{180°}{\pi \text{ rad}}\right) \times \text{rad}$$

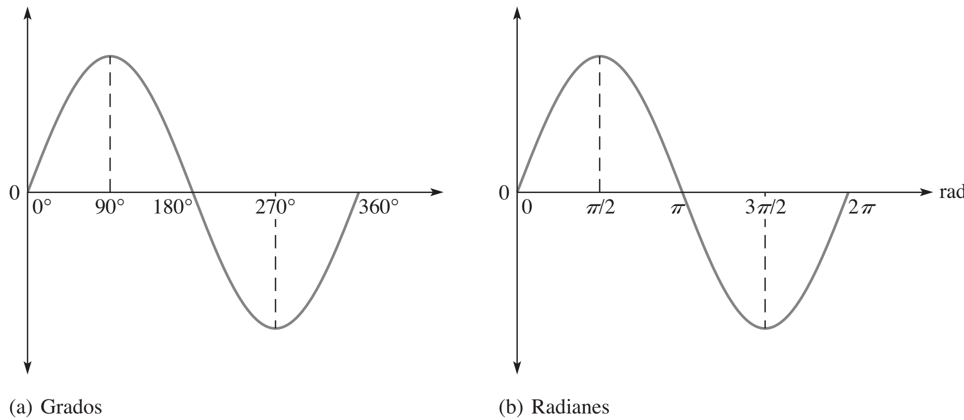
EJEMPLO 11–8 **(a)** Convierta 60° en radianes. **(b)** Convierta $\pi/6$ rad en grados.

Solución **(a)** $\text{Rad} = \left(\frac{\pi \text{ rad}}{180°}\right)60° = \boldsymbol{\frac{\pi}{3}}$ **rad** **(b)** $\text{Grados} = \left(\frac{180°}{\pi \text{ rad}}\right)\left(\frac{\pi}{6}\text{rad}\right) = \mathbf{30°}$

Problema relacionado **(a)** Convierta 15° en radianes. **(b)** Convierta $5\pi/8$ rad en grados.

Ángulos de onda seno

La medición angular de una onda seno se basa en 360° o 2π para un ciclo completo. Medio ciclo son 180° o π rad; un cuarto de ciclo son 90° o $\pi/2$ rad; y así sucesivamente. La figura 11-23(a) muestra ángulos en grados para un ciclo completo de una onda seno; la parte (b) muestra los mismos puntos en radianes.

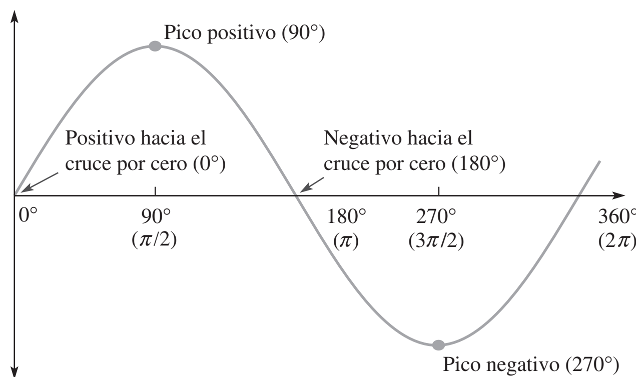


▲ **FIGURA 11–23**

Ángulos de onda seno.

Fase de una onda seno

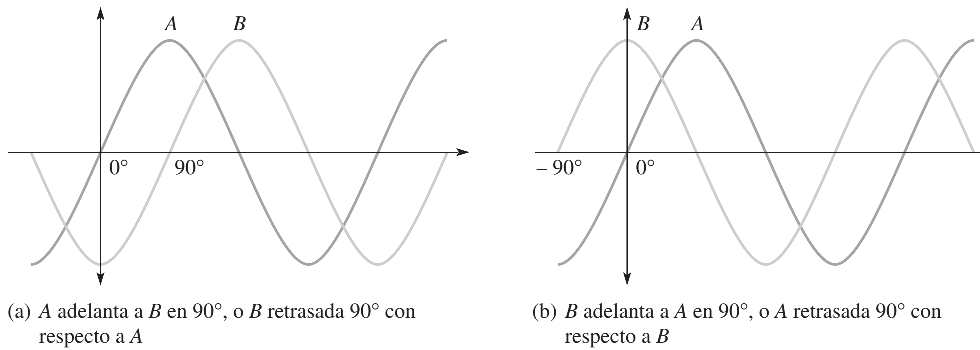
La **fase** de una onda seno es una medición angular que especifica la posición de dicha onda seno con respecto a una referencia. La figura 11-24 muestra un ciclo de una onda seno que se utilizará como referencia. Observe que el primer cruce hacia positivo del eje horizontal (cruce por cero) se localiza en 0° (0 rad), y el pico positivo está en 90° ($\pi/2$ rad). El cruce por 0 hacia negativo está en 180° (π rad), y el pico negativo está en 270° ($3\pi/2$ rad). El ciclo se completa en 360° (2π rad). Cuando la onda seno de desplaza hacia la izquierda o la derecha con respecto a esta referencia, hay un desplazamiento de fase.



▲ **FIGURA 11–24**

Referencia de fase.

La figura 11-25 ilustra desplazamientos de fase de una onda seno. En la parte (a), la onda seno B se desplazó hacia la derecha en 90° ($\pi/2$ rad) con respecto a la onda seno A. Por tanto, hay un ángulo de fase de 90° entre la onda seno A y la onda seno B. En función del tiempo, el pico positivo de la onda seno B ocurre después que el pico positivo de la onda seno A porque el tiempo se incrementa hacia la derecha a lo largo del eje horizontal. En este caso, se dice que la onda seno B está **retrasada** con respecto a la onda seno A en 90° o $\pi/2$ radianes. Expresado de otra manera, la onda seno A va 90° adelante de la onda seno B.



(a) *A* adelanta a *B* en 90°, o *B* retrasada 90° con respecto a *A*

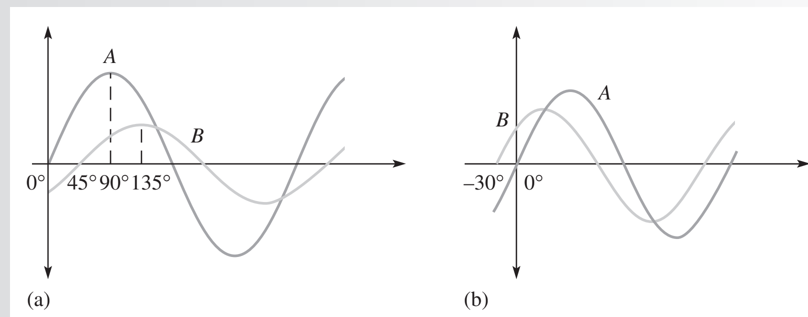
(b) *B* adelanta a *A* en 90°, o *A* retrasada 90° con respecto a *B*

▲ **FIGURA 11–25**

Ilustración de un desplazamiento de fase.

En la figura 11-25(b), la onda seno *B* aparece desplazada en 90° hacia la izquierda con respecto a la onda seno *A*. Por tanto, de nuevo existe un ángulo de fase de 90° entre la onda seno *A* y la onda seno *B*. En este caso, el pico positivo de la onda seno *B* ocurre antes que el de la onda seno *A*; por consiguiente, se dice que la onda seno *B* va 90° **adelante** de la onda seno *A*.

EJEMPLO 11–9 ¿Cuáles son los ángulos de fase entre las dos ondas seno de las partes (a) y (b) de la figura 11-26?



▲ **FIGURA 11–26**

Solución En la figura 11-26(a) el cruce por cero de la onda seno *A* ocurre en 0°, y el cruce por cero correspondiente de la onda seno *B* ocurre en 45°. Existe un ángulo de fase de 45° entre las dos formas de onda con la onda seno *B* retrasada con respecto a la onda seno *A*.

En la figura 11-26(b) el cruce por cero de la onda seno *B* ocurre en −30°, y el cruce por cero correspondiente de la onda seno *A* ocurre en 0°. Existe un ángulo de fase de 30° entre las dos formas de onda con la onda seno *B* adelante de la onda seno *A*.

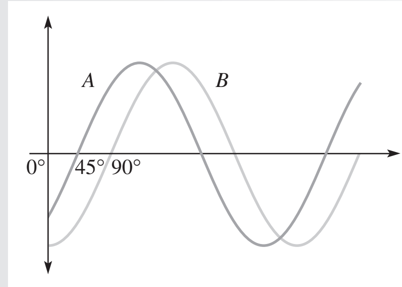
Problema relacionado Si el cruce por cero hacia positivo de una onda seno ocurre en 15° y el cruce de la segunda onda seno ocurre en 23°, ¿cuál es el ángulo de fase entre estas ondas?

Como cuestión práctica, cuando se mide el desplazamiento de fase entre dos formas de onda con un osciloscopio, se deberá hacer que parezca que tienen la misma amplitud. Esto se hace sacando uno de los canales del osciloscopio de su calibración vertical y ajustando la forma de onda correspondiente hasta que su amplitud aparente sea igual a la de la otra forma de onda. Este procedimiento elimina el error provocado si ambas formas de onda no se midieran en su centro exacto.

REPASO DE LA SECCIÓN 11-4

1. Cuando el cruce por cero hacia positivo de una onda seno ocurre en 0°, ¿a qué ángulo ocurre cada uno de los siguientes puntos?
   (a) Pico positivo **(b)** Cruce por cero hacia negativo
   (c) Pico negativo **(d)** Final del primer ciclo completo
2. Un medio ciclo se completa en ________ grados o ________ radianes.
3. Un ciclo completo ocurre en _________ grados o ________ radianes.
4. Determine el ángulo de fase entre las dos ondas seno de la figura 11-27.

▶ **FIGURA 11–27**



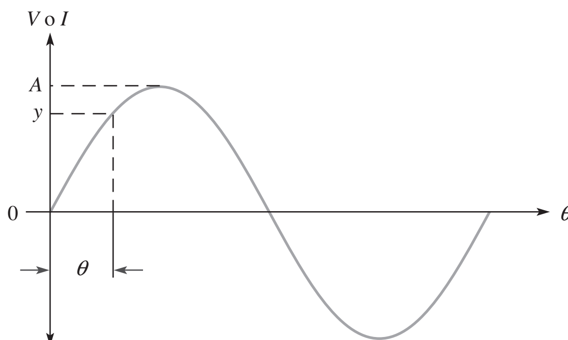
11–5 LA FÓRMULA DE LA ONDA SENO

Una onda seno puede representarse gráficamente mediante valores de voltaje o corriente en el eje vertical y por una medición angular (grados o radianes) a lo largo del eje horizontal. Esta gráfica puede ser expresada matemáticamente, como se verá.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar matemáticamente una forma de onda sinusoidal**
  - Enunciar la fórmula de la onda seno
  - Determinar valores instantáneos con la fórmula de la onda seno

En la figura 11-28 se muestra una gráfica generalizada de un ciclo de una onda seno. La amplitud de ésta (A) es el valor máximo de voltaje o corriente en el eje vertical; los valores angulares aparecen a lo largo del eje horizontal. La variable y es un valor instantáneo que representa o voltaje o corriente a un ángulo dado, θ. El símbolo θ es la letra griega *teta*.



◀ **FIGURA 11–28**

Ciclo de una onda seno genérica que muestra amplitud y fase.

Todas las ondas seno eléctricas siguen una fórmula matemática específica. La expresión general para la onda seno que aparece en la figura 11-28 es

Ecuación 11–16

$$y = A \text{ sen } \theta$$

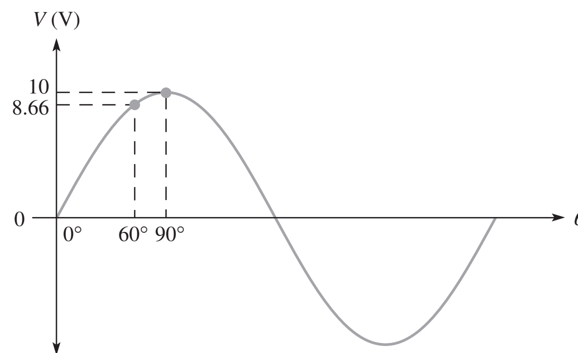
Esta fórmula establece que cualquier punto en la onda seno, representado por un valor instantáneo (y), es igual al valor máximo A por el seno (sen) del ángulo θ en dicho punto. Por ejemplo, cierta onda seno de voltaje tiene un valor pico de 10 V. Se puede calcular el voltaje instantáneo en un punto localizado en 60° a lo largo del eje horizontal como sigue, donde $y = v$ y $A = V_p$.

$$v = V_p \text{sen } \theta = (10 \text{ V})\text{sen } 60° = (10 \text{ V})(0.866) = 8.66 \text{ V}$$

La figura 11-29 muestra este valor instantáneo particular de la curva. Se puede encontrar el seno de cualquier ángulo con la mayoría de las calculadoras ingresando primero el valor del ángulo y oprimiendo luego la tecla “sin”. Cerciórese de que la calculadora esté en el modo de grados.

▶ **FIGURA 11–29**

Ilustración del valor instantáneo de una onda seno de voltaje en $\theta = 60°$.



Expresiones para ondas seno con desplazamiento de fase

Cuando una onda seno se desplaza hacia la derecha de la referencia (retrasándose) en cierto ángulo, ϕ (letra griega fi), como ilustra la figura 11-30(a), donde la referencia es el eje vertical, la expresión general es

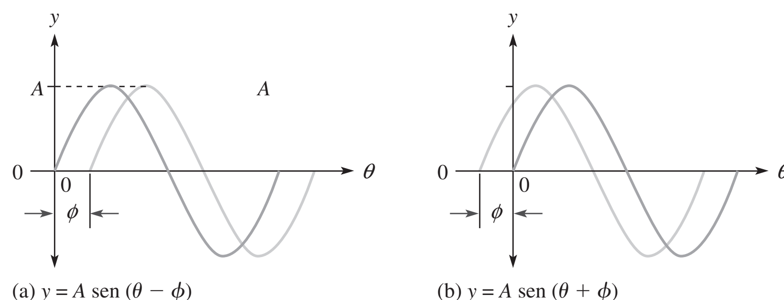
Ecuación 11–17

$$y = A \text{ sen}(\theta - \phi)$$

donde y representa voltaje o corriente instantáneos y A representa el valor pico (amplitud). Cuando una onda seno se desplaza hacia la izquierda (adelantándose) en cierto ángulo, ϕ, según muestra la figura 11-30(b), la expresión general es

Ecuación 11–18

$$y = A \text{ sen}(\theta + \phi)$$

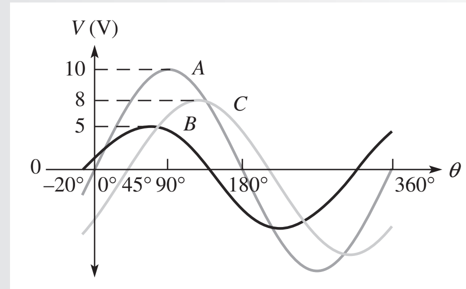


▲ **FIGURA 11–30**

Ondas seno desfasadas.

EJEMPLO 11–10 Determine el valor instantáneo en el punto de referencia de 90° sobre el eje horizontal de cada una de las ondas seno mostradas en la figura 11-31.

▶ **FIGURA 11–31**



Solución La onda seno A es la referencia. La onda seno B se desplaza hacia la izquierda 20° con respecto a A, de modo que se adelanta. La onda seno C se desplaza hacia la derecha 45° con respecto a A, así que se retrasa.

$$v_A = V_p \text{sen}\,\theta$$
$$= (10\text{ V})\text{sen}(90°) = (10\text{ V})(1) = \mathbf{10\text{ V}}$$
$$v_B = V_p \text{sen}(\theta + \phi_B)$$
$$= (5\text{ V})\text{sen}(90° + 20°) = (5\text{ V})\text{sen}(110°) = (5\text{ V})(0.9397) = \mathbf{4.70\text{ V}}$$
$$v_C = V_p \text{sen}(\theta - \phi_C)$$
$$= (8\text{ V})\text{sen}(90° - 45°) = (8\text{ V})\text{sen}(45°) = (8\text{ V})(0.7071) = \mathbf{5.66\text{ V}}$$

Problema relacionado El valor pico de una onda seno de voltaje es de 20 V. ¿Cuál es el valor instantáneo a 65° de su cruce por cero?

REPASO DE LA SECCIÓN 11-5

1. **Calcule el valor instantáneo en 120° para la onda seno de voltaje mostrada en la figura 11-29.**
2. **Determine el valor instantáneo en 45° de una onda seno de voltaje que aparece adelantada en 10° con respecto a la referencia (V_p = 10 V).**
3. **Determine el valor instantáneo de 90° de una onda seno de voltaje que aparece adelantada en 25° con respecto a la referencia (V_p = 5 V).**

11–6 INTRODUCCIÓN A LOS FASORES

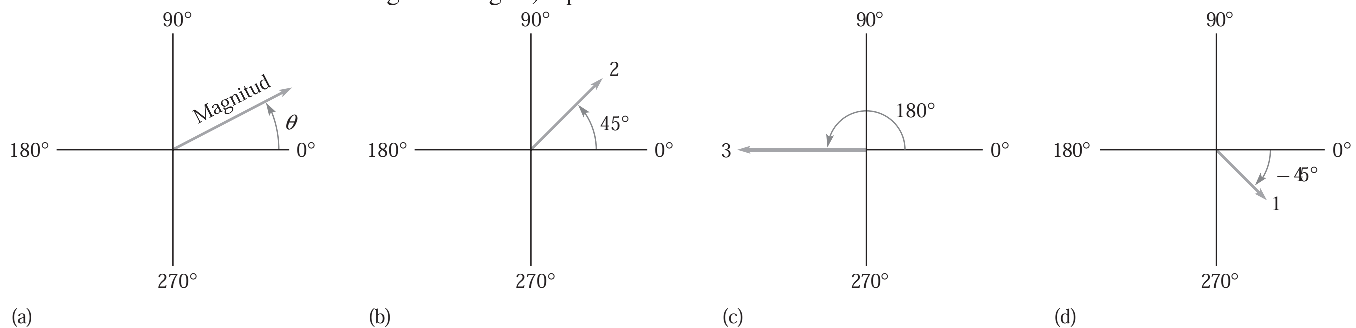
Los fasores proporcionan un método gráfico para representar cantidades que tienen tanto magnitud como dirección (posición angular). Los fasores son especialmente útiles para representar ondas seno en función de su magnitud y su ángulo de fase, y también para analizar los circuitos reactivos incluidos en capítulos posteriores.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar un fasor para representar una onda seno**
  - Definir el término *fasor*
  - Explicar cómo están relacionados los fasores con la fórmula de la onda seno
  - Trazar un diagrama fasorial
  - Analizar la velocidad angular

Puede ser que usted ya esté familiarizado con los vectores. En matemáticas y ciencias, un vector es cualquier cantidad que tiene tanto magnitud como dirección. Ejemplos de vectores son la fuerza, la velocidad y la aceleración. La manera más simple de describir un vector es asignando una magnitud y un ángulo a una cantidad.

En electrónica, un **fasor** es un tipo de vector; pero el término en general se refiere a cantidades que varían con el tiempo, tal como las ondas seno. En la figura 11-32 se muestran ejemplos de fasores. La longitud de la "flecha" del fasor representa la magnitud de una cantidad. El ángulo, θ (con respecto a 0°), representa la posición angular, según muestra la parte (a) para un ángulo positivo. El ejemplo de fasor específico de la parte (b) tiene magnitud de 2 y ángulo de fase de 45°. El fasor de la parte (c) tiene magnitud de 3 y ángulo de fase de 180°. El fasor de la parte (d) tiene magnitud de 1 y ángulo de fase de $-45°$ (o $+315°$). Observe que los ángulos positivos se miden en sentido contrario al de las manecillas del reloj (CCW, por sus siglas en inglés) a partir de la referencia (0°), y los ángulos negativos se miden en el sentido de las manecillas del reloj (CW, por sus siglas en inglés) a partir de la referencia.



▲ **FIGURA 11–32**

Ejemplos de fasores.

Representación fasorial de una onda seno

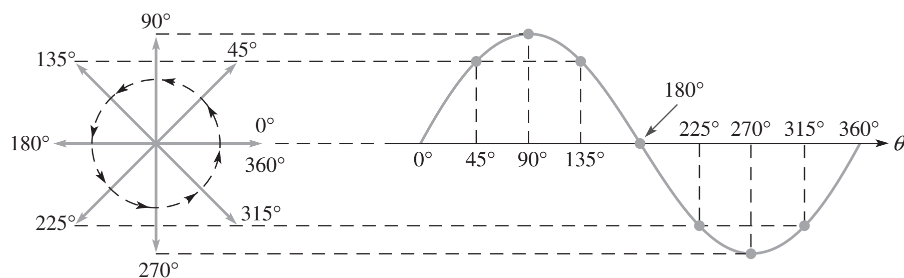
Un ciclo completo de una onda seno puede ser representado por la rotación de 360° de un fasor.

> **El valor instantáneo de la onda seno en cualquier punto es igual a la distancia vertical desde la punta del fasor hasta el eje horizontal.**

La figura 11-33 muestra cómo traza el fasor la onda seno conforme va desde 0 hasta 360°. Se puede relacionar este concepto con la rotación que se presenta en un generador de ca. Advierta que la longitud del fasor es igual al valor pico de la onda seno (observe los puntos de 90° y 270°). El ángulo del fasor medido a partir de 0° es el punto angular correspondiente en la onda seno.

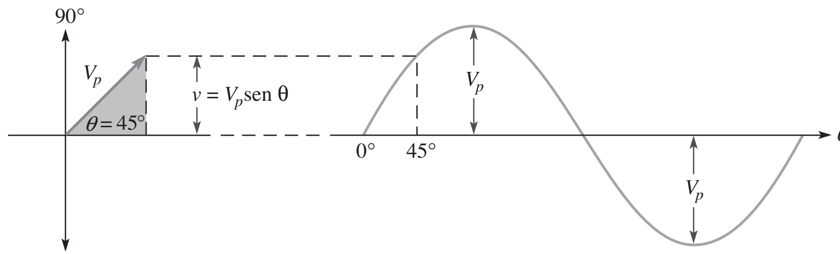
▶ **FIGURA 11–33**

Onda seno representada por el movimiento rotatorio de un fasor.



Fasores y la fórmula de la onda seno

Examinemos una representación fasorial a un ángulo específico. La figura 11-34 muestra un fasor de voltaje en una posición angular de 45° y el punto correspondiente en la onda seno. En este punto, el valor instantáneo de la onda seno está relacionado con la posición y con la longitud



▲ **FIGURA 11–34**

Derivación con un ángulo rectángulo de la fórmula de la onda seno.

del fasor. Como previamente se mencionó, la distancia vertical desde la punta del fasor hasta el eje horizontal representa el valor instantáneo de la onda seno en dicho punto.

Observe que, cuando se traza una línea vertical desde la punta del fasor hasta el eje horizontal, se forma un triángulo rectángulo, como ilustra el área sombreada en la figura 11-34. La longitud del fasor es la hipotenusa del triángulo, y la proyección vertical es el lado opuesto. Por trigonometría,

El lado opuesto de un triángulo rectángulo es igual a la hipotenusa por el seno del ángulo θ.

La longitud del fasor es el valor pico del voltaje sinusoidal, V_p. Por tanto, el lado opuesto del triángulo, que es el valor instantáneo, se expresa como

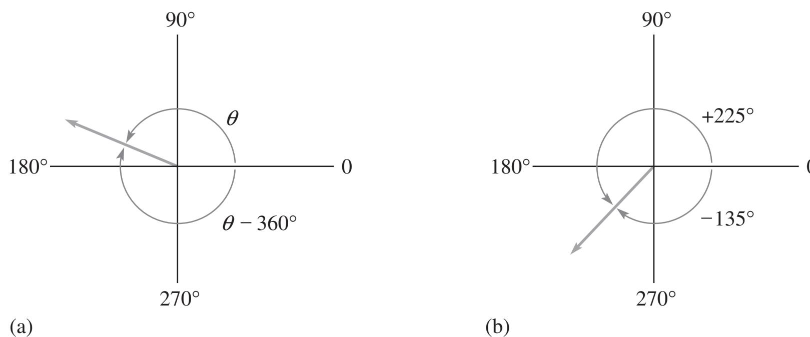
$$v = V_p \text{sen } \theta$$

Recuerde que esta fórmula es la misma enunciada con anterioridad para calcular voltaje sinusoidal instantáneo. Una fórmula similar se aplica a una corriente sinusoidal.

$$i = I_p \text{sen } \theta$$

Ángulos fasoriales positivos y negativos

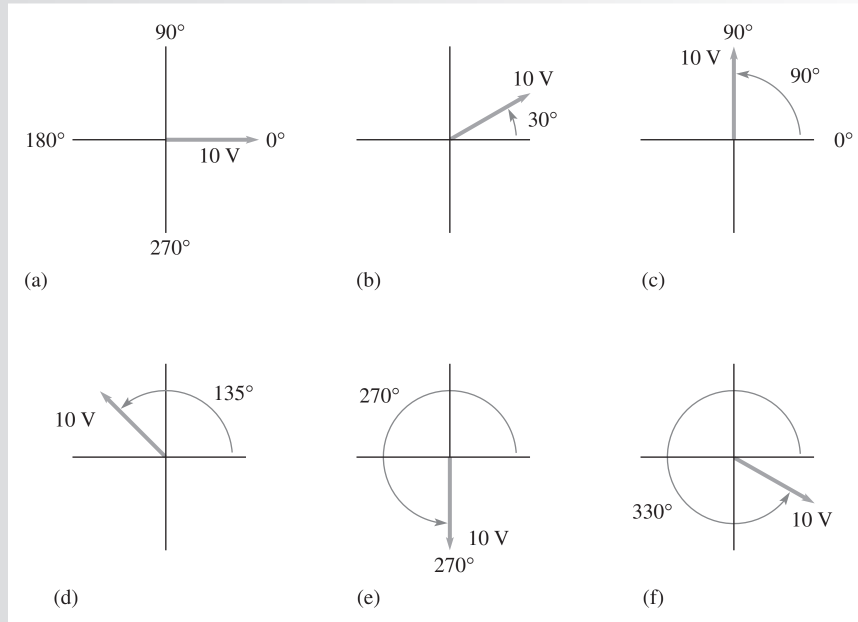
La posición de un fasor en cualquier instante puede expresarse como un ángulo positivo, como ya se vio, o como un ángulo negativo equivalente. Los ángulos positivos se miden en sentido contrario al de las manecillas del reloj a partir de 0°. Los ángulos negativos se miden en el mismo sentido de las manecillas del reloj a partir de 0°. Para un ángulo positivo dado θ, el ángulo negativo correspondiente es $\theta - 360°$, como ilustra la figura 11-35(a). En la parte (b), se muestra un ejemplo específico. El ángulo del fasor se expresa en este caso como $+225°$ o $-135°$.



▲ **FIGURA 11–35**

Ángulos de fasor positivos y negativos.

EJEMPLO 11–11 Para el fasor localizado en cada inciso de la figura 11-36, determine el valor del voltaje instantáneo. También exprese cada ángulo positivo mostrado como un ángulo negativo equivalente. La longitud de cada fasor representa el valor pico del voltaje sinusoidal.



▲ FIGURA 11–36

Solución

(a) $v = (10\text{ V})\text{sen }0° = (10\text{ V})(0) = \mathbf{0\text{ V}}$
$0° - 360° = \mathbf{-360°}$

(b) $v = (10\text{ V})\text{sen }30° = (10\text{ V})(0.5) = \mathbf{5\text{ V}}$
$30° - 360° = \mathbf{-330°}$

(c) $v = (10\text{ V})\text{sen }90° = (10\text{ V})(1) = \mathbf{10\text{ V}}$
$90° - 360° = \mathbf{-270°}$

(d) $v = (10\text{ V})\text{sen }135° = (10\text{ V})(0.707) = \mathbf{7.07\text{ V}}$
$135° - 360° = \mathbf{-225°}$

(e) $v = (10\text{ V})\text{sen }270° = (10\text{ V})(-1) = \mathbf{-10\text{ V}}$
$270° - 360° = \mathbf{-90°}$

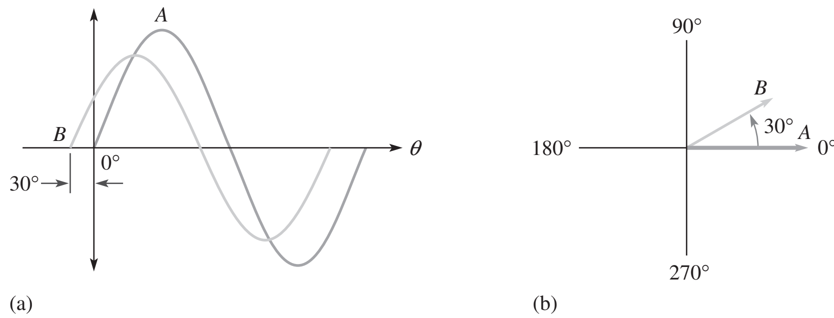
(f) $v = (10\text{ V})\text{sen }330° = (10\text{ V})(-0.5) = \mathbf{-5\text{ V}}$
$330° - 360° = \mathbf{-30°}$

Problema relacionado Si un fasor está a 45° y su longitud representa 15 V, ¿cuál es el valor instantáneo de la onda seno?

Diagramas fasoriales

Es posible utilizar un diagrama fasorial para demostrar la relación relativa de dos o más ondas seno de igual frecuencia. Se utiliza un fasor en una *posición fija* para representar una onda seno completa porque una vez establecido el ángulo de fase entre dos o más ondas seno de la misma

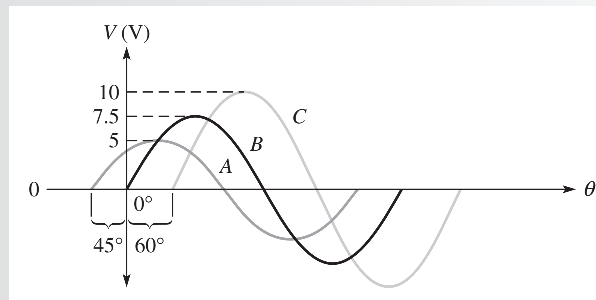
frecuencia o entre la onda seno y una referencia, el ángulo de fase permanece constante durante todos los ciclos. Por ejemplo, las dos ondas seno de la figura 11-37(a) pueden ser representadas mediante un diagrama fasorial, según muestra la parte (b). Como se puede ver, la onda seno *B* adelanta en 30° a la onda seno *A* y tiene menos amplitud que la onda seno *A*, así lo indican las longitudes de los fasores.



▲ **FIGURA 11–37**

Ejemplo de un diagrama fasorial que representa formas de onda sinusoidales.

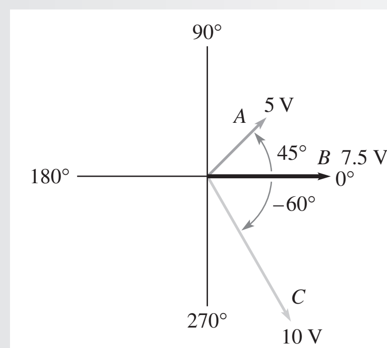
EJEMPLO 11–12 Use el diagrama fasorial para representar las ondas seno mostradas en la figura 11-38.



▲ **FIGURA 11–38**

Solución El diagrama fasorial que representa las ondas seno se muestra en la figura 11-39. La longitud de cada fasor representa el valor pico de la onda seno.

▶ **FIGURA 11–39**



Problema relacionado Describa un fasor para representar una onda seno pico de 5 V retrasada 25° con respecto a la onda seno *C* que muestra la figura 11-38.

Velocidad angular de un fasor

Como ya vimos, un ciclo de una onda seno se describe cuando un fasor gira 360 grados o 2π radianes. Mientras más rápido gira, más rápido se describe el ciclo de la onda seno. Por tanto, el periodo y la frecuencia están relacionados con la velocidad de rotación del fasor. La velocidad de rotación se llama **velocidad angular** y se designa mediante ω (la letra minúscula griega omega).

Cuando un fasor gira 2π radianes, se describe un ciclo completo. Por consiguiente, el tiempo requerido para que el fasor recorra 2π radianes es el periodo de la onda seno. Dado que el fasor gira 2π radianes en un tiempo igual al periodo T, la velocidad angular se expresa como

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Puesto que $f = 1/T$,

Ecuación 11–19

$$\omega = 2\pi f$$

Cuando un fasor gira a una velocidad angular ω, entonces ωt es el ángulo descrito por el fasor en cualquier instante. Por consiguiente, se puede establecer la siguiente relación:

Ecuación 11–20

$$\theta = \omega t$$

Al sustituir ω por $2\pi f$ se obtiene $\theta = 2\pi ft$. Con esta relación entre ángulo y tiempo, la ecuación para el valor instantáneo de un voltaje sinusoidal, $v = V_p\text{sen}\,\theta$, puede escribirse como

Ecuación 11–21

$$v = V_p\text{sen}\,2\pi ft$$

Es posible calcular el valor instantáneo en cualquier punto en el tiempo a lo largo de la curva de la onda seno si se conocen la frecuencia y el valor pico. La unidad de $2\pi ft$ es el radian, por lo que la calculadora debe estar en el modo de radianes.

EJEMPLO 11–13 ¿Cuál es el valor de un voltaje sinusoidal 3 μs después del cruce por cero hacia positivo cuando $V_p = 10$ V y $f = 50$ kHz?

Solución

$$v = V_p\text{sen}\,2\pi ft$$
$$= (10\text{ V})\text{sen}[2\pi(50\text{ kHz})(3 \times 10^{-6}\text{ s})] = \mathbf{8.09\ V}$$

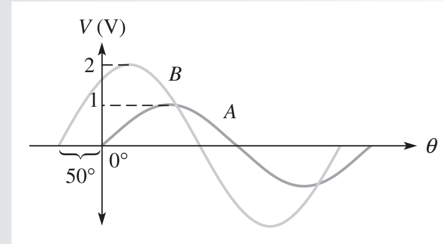
Problema relacionado ¿Cuál es el valor de un voltaje sinusoidal 12 μs después del cruce por cero hacia positivo cuando $V_p = 50$ V y $f = 10$ kHz?

REPASO DE LA SECCIÓN 11-6

1. ¿Qué es un fasor?
2. ¿Cuál es la velocidad angular de un fasor que representa una onda seno con una frecuencia de 1500 Hz?
3. La velocidad angular de cierto fasor es de 628 rad/s. ¿A qué frecuencia corresponde esta velocidad?

4. Trace un diagrama fasorial para representar las dos ondas seno de la figura 11-40. Use valores pico.

▶ FIGURA 11–40



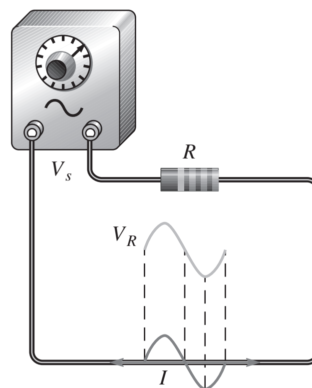
11–7 ANÁLISIS DE CIRCUITOS DE CA

Cuando a un circuito se le aplica un voltaje de ca que varía con el tiempo, tal como un voltaje sinusoidal, las leyes de circuito y las fórmulas de potencia que se aprendieron con anterioridad aún son aplicables. La ley de Ohm, las leyes de Kirchhoff, y las fórmulas de potencia se aplican a circuitos de ca de igual forma que se aplican a circuitos de cd.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar las leyes de circuito básicas a circuitos de ca resistivos**
  - Aplicar la ley de Ohm a circuitos resistivos con fuentes de ca
  - Aplicar la leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff a circuitos resistivos con fuentes de ca
  - Determinar la potencia en circuitos de ca resistivos

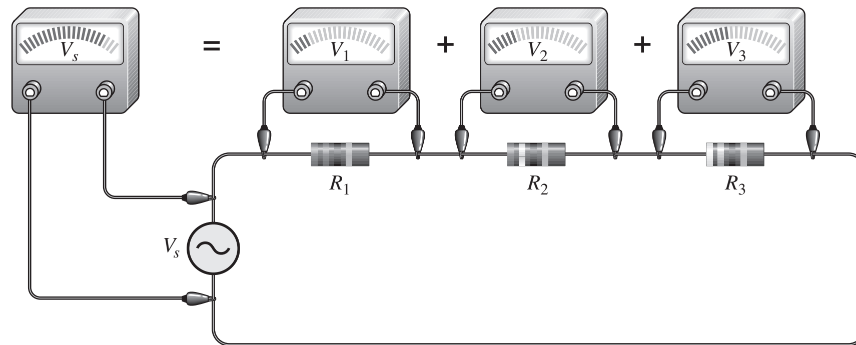
Si se aplica un voltaje sinusoidal entre los extremos de un resistor como indica la figura 11-41, se produce una corriente sinusoidal. Ésta es de magnitud cero cuando el voltaje es de cero, y es máxima cuando el voltaje es máximo. Cuando el voltaje cambia de polaridad, la corriente invierte su dirección. Por consiguiente, se dice que el voltaje y la corriente están en fase entre sí.



◀ FIGURA 11–41

Un voltaje sinusoidal produce corriente sinusoidal.

Cuando utilice la ley de Ohm en circuitos de ca, recuerde que el voltaje y la corriente deben expresarse consistentemente, es decir, ambos como valores pico, ambos como valores rms, ambos como valores promedio, y así sucesivamente. Las leyes del voltaje y de la corriente de Kirchhoff se aplican tanto a circuitos de ca como a circuitos de cd. La figura 11-42 ilustra la ley del voltaje de Kirchhoff en un circuito resistivo que tiene una fuente de voltaje sinusoidal. El voltaje de fuente es la suma de todas las caídas de voltaje entre los extremos de los resistores, como en un circuito de cd.



▲ **FIGURA 11–42**

Ilustración de la ley del voltaje de Kirchhoff en un circuito de ca.

La potencia en circuitos de ca resistivos se determina del mismo modo que para circuitos de cd, excepto que se deben utilizar valores rms de corriente y voltaje. Recuerde que el valor rms de un voltaje de onda seno equivale a un voltaje de cd del mismo valor en función de su efecto de calentamiento. Las fórmulas generales de potencia se replantean para un circuito de ca como

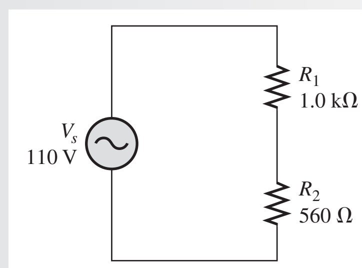
$$P = V_{rms}I_{rms}$$

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

$$P = I_{rms}^2R$$

EJEMPLO 11–14 En la figura 11-43, determine el voltaje rms presente entre los extremos de cada resistor y la corriente rms. La fuente de voltaje se da como valor rms. Determine, además, la potencia total.

▶ **FIGURA 11–43**



Solución La resistencia total del circuito es

$$R_{tot} = R_1 + R_2 = 1.0\,\text{k}\Omega + 560\,\Omega = 1.56\,\text{k}\Omega$$

Use la ley de Ohm para determinar la corriente rms.

$$I_{rms} = \frac{V_{s(rms)}}{R_{tot}} = \frac{110\text{ V}}{1.56\,\text{k}\Omega} = \mathbf{70.5\,mA}$$

La caída de voltaje rms entre los extremos de cada resistor es

$$V_{1(\text{rms})} = I_{\text{rms}}R_1 = (70.5 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = \mathbf{70.5 \text{ V}}$$
$$V_{2(\text{rms})} = I_{\text{rms}}R_2 = (70.5 \text{ mA})(560 \ \Omega) = \mathbf{39.5 \text{ V}}$$

La potencia total es

$$P_{tot} = I_{\text{rms}}^2 R_{tot} = (70.5 \text{ mA})^2(1.56 \text{ k}\Omega) = 7.75 \text{ W}$$

Problema relacionado Repita este ejemplo con una fuente de voltaje de 10 V pico.



Use el archivo Multisim E11-14 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

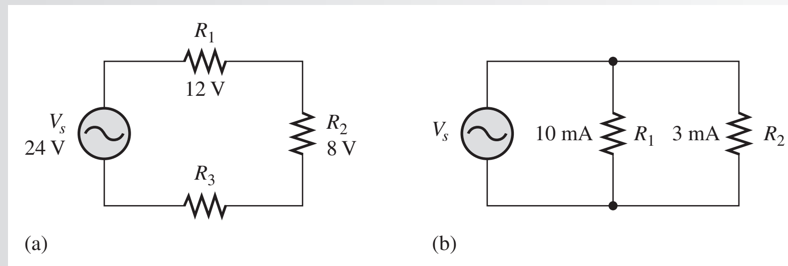
EJEMPLO 11–15 Todos los valores que aparecen en la figura 11-44 son rms.

(a) Determine la caída del voltaje pico desconocido en la figura 11-44(a).

(b) Determine la corriente rms total en la figura 11-44(b).

(c) Determine la potencia total en la figura 11-44(b) si $V_{\text{rms}} = 24$ V.

▶ **FIGURA 11–44**



Solución **(a)** Use la ley del voltaje de Kirchhoff para determinar V_3.

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3$$
$$V_{3(\text{rms})} = V_{s(\text{rms})} - V_{1(\text{rms})} - V_{2(\text{rms})} = 24 \text{ V} - 12 \text{ V} - 8 \text{ V} = 4 \text{ V}$$

Convierta el valor rms en valor pico,

$$V_{3(p)} = 1.414V_{3(\text{rms})} = 1.414(4 \text{ V}) = \mathbf{5.66 \text{ V}}$$

(b) Use la ley de la corriente de Kirchhoff para determinar I_{tot}.

$$I_{tot(\text{rms})} = I_{1(\text{rms})} + I_{2(\text{rms})} = 10 \text{ mA} + 3 \text{ mA} = \mathbf{13 \text{ mA}}$$

(c) $P_{tot} = V_{\text{rms}}I_{\text{rms}} = (24 \text{ V})(13 \text{ mA}) = \mathbf{312 \text{ mW}}$

Problema relacionado Un circuito en serie tiene las siguientes caídas de voltaje: $V_{1(\text{rms})} = 3.50$ V, $V_{2(p)} = 4.25$ V, $V_{3(\text{prom})} = 1.70$ V. Determine el voltaje pico a pico de la fuente.

REPASO DE LA SECCIÓN 11-7

1. Se aplica un voltaje sinusoidal con un valor promedio de medio ciclo de 12.5 V a un circuito con una resistencia de 330 Ω. ¿Cuál es la corriente pico en el circuito?
2. Las caídas del voltaje pico en un circuito resistivo dispuesto en serie son de 6.2 V, 11.3 V, y 7.8 V. ¿Cuál es el valor rms del voltaje de fuente?

11–8 VOLTAJES SUPERPUESTOS DE CD Y DE CA

En muchos circuitos prácticos, se encontrarán tanto voltajes de cd como de ca combinados. Un ejemplo de esto se encuentra en circuitos de amplificador donde los voltajes de señal de ca se superponen en los voltajes de operación de cd. Esta es una aplicación común del teorema de superposición estudiado en el capítulo 8.

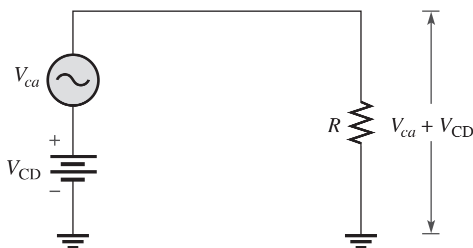
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar voltajes totales que tienen tanto componentes de ca como de cd**

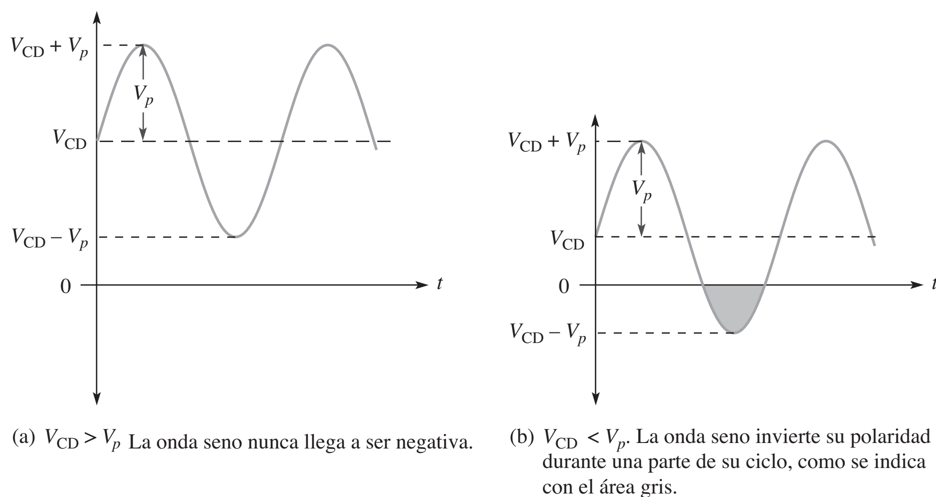
La figura 11-45 muestra una fuente de cd y una de ca dispuestas en serie. Estos dos voltajes se sumarán algebraicamente para producir un voltaje de ca “montado” en un nivel de cd, medido entre los extremos de un resistor.

▶ **FIGURA 11–45**

Voltajes de cd y de ca superpuestos.



Si V_{CD} es mayor que el valor pico del voltaje sinusoidal, el voltaje combinado es una onda seno que nunca invierte su polaridad y es, por consiguiente, no alterna. Es decir, la onda aparece montada en un nivel de cd, como se muestra en la figura 11-46(a). Si V_{CD} es menor que el valor pico de la onda seno, ésta será negativa durante una parte de su medio ciclo inferior, según ilustra la figura 11-46(b), y es, por tanto, alterna. En ambos casos, la onda seno alcanzará un voltaje máximo igual a $V_{CD} + V_p$, y alcanzará un voltaje mínimo igual a $V_{CD} - V_p$.



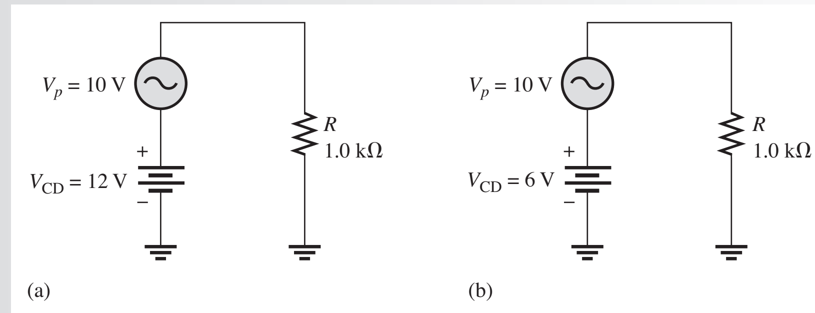
(a) $V_{CD} > V_p$ La onda seno nunca llega a ser negativa.

(b) $V_{CD} < V_p$. La onda seno invierte su polaridad durante una parte de su ciclo, como se indica con el área gris.

▲ **FIGURA 11–46**

Ondas seno con niveles de cd.

EJEMPLO 11–16 Determine los voltajes máximo y mínimo entre los extremos del resistor para cada uno de los circuitos de la figura 11-47.



▲ **FIGURA 11–47**

Solución En la figura 11-47(a), el voltaje máximo entre los extremos de *R* es

$$V_{máx} = V_{CD} + V_p = 12\text{ V} + 10\text{ V} = \mathbf{22\text{ V}}$$

El voltaje mínimo entre los extremos de *R* es

$$V_{mín} = V_{CD} - V_p = 12\text{ V} - 10\text{ V} = \mathbf{2\text{ V}}$$

Por consiguiente, $V_{R(tot)}$ es una onda seno no alterna que varía desde +22 V hasta +2V, como se muestra en la figura 11-48(a).

En la figura 11-47(b), el voltaje máximo entre los extremos de *R* es

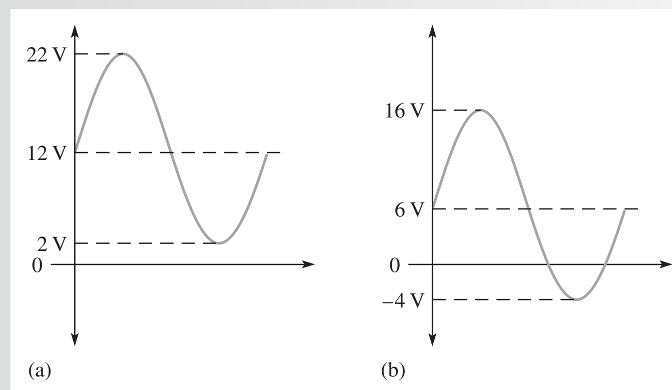
$$V_{máx} = V_{CD} + V_p = 6\text{ V} + 10\text{ V} = \mathbf{16\text{ V}}$$

El voltaje mínimo entre los extremos de *R* es

$$V_{mín} = V_{CD} - V_p = \mathbf{-4\text{ V}}$$

Por consiguiente, $V_{R(tot)}$ es una onda seno alterna que varía desde +16 V hasta –4 V, como se muestra en la figura 11-48(b).

▶ **FIGURA 11–48**



Problema relacionado Explique por qué la forma de onda mostrada en la figura 11-48(a) es no alterna pero la de la parte (b) sí se considera alterna.



Use los archivos Multisim E11-16A y E11-16B para verificar los resultados calculados en este ejemplo.

REPASO DE LA SECCIÓN 11-8

1. ¿Cuál es el valor máximo positivo del voltaje total resultante cuando una onda seno con $V_p = 5$ V se suma a un voltaje de cd de +2.5 V?
2. ¿Alternará de polaridad el voltaje resultante de la pregunta 1?
3. Si el voltaje de cd de la pregunta 1 es de −2.5 V, ¿cuál es el valor positivo máximo del voltaje total resultante?

11–9 FORMAS DE ONDA NO SINUSOIDALES

Las ondas seno son importantes en electrónica, pero de ningún modo son el único tipo de forma de onda de ca o variable con el tiempo. Otros dos tipos importantes de formas de onda son la forma de onda pulsante y la forma de onda triangular.

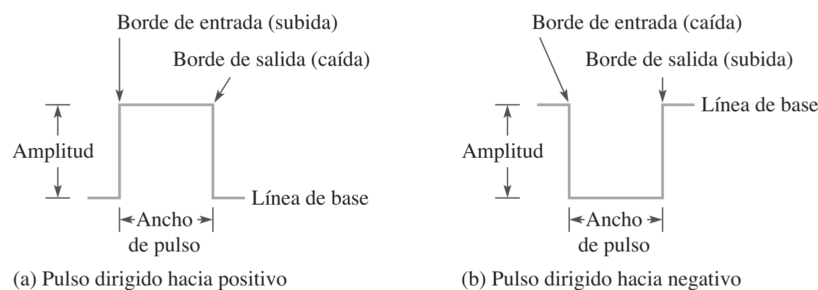
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Identificar las características de formas de onda no sinusoidales básicas**
  - Analizar las propiedades de una forma de onda pulsante
  - Definir el término *ciclo de trabajo*
  - Analizar las propiedades de formas de onda triangulares y de diente de sierra
  - Analizar el contenido armónico de una forma de onda

Formas de onda pulsantes

De modo básico, un **pulso** puede ser descrito como una transición muy rápida (**borde de entrada**) de un nivel de corriente o voltaje (**línea de base**) a un nivel de amplitud, y luego, después de un intervalo de tiempo, una transición muy rápida (**borde de salida**) de regreso al nivel de línea de base original. Las transiciones de nivel también se llama *escalones*. Un pulso ideal consta de dos escalones opuestos de igual magnitud. Cuando el borde de entrada o de salida se dirige a positivo, se llama **borde de subida**. Cuando el borde de entrada o de salida se dirige a negativo, se llama **borde de caída**.

La figura 11-49(a) muestra un pulso ideal dirigido hacia positivo compuesto por dos escalones instantáneos iguales pero opuestos separados por un intervalo de tiempo llamado *ancho de pulso*. La parte (b) de la figura 11-49 muestra un pulso ideal dirigido hacia negativo. La altura del pulso medido desde la línea de base es su amplitud de voltaje (o de corriente).



▶ **FIGURA 11–49**
Pulsos ideales.

En muchas aplicaciones, el análisis se simplifica si todos los pulsos se tratan como ideales (compuestos de escalones instantáneos y perfectamente rectangulares). Los pulsos reales, sin embargo, nunca son ideales. Todos los pulsos poseen ciertas características que los hacen ser diferentes de los ideales.

En la práctica, los pulsos no pueden cambiar de un nivel a otro instantáneamente. Siempre se requiere tiempo para efectuar una transición (escalón), como ilustra la figura 11-50(a). Como se puede ver, existe un intervalo de tiempo durante el borde de subida en el cual el pulso va de su valor más bajo a su valor más alto. Este intervalo se llama *tiempo de subida*, t_r.

El tiempo de subida es el tiempo requerido para que el pulso vaya desde el 10 hasta el 90% de su amplitud.

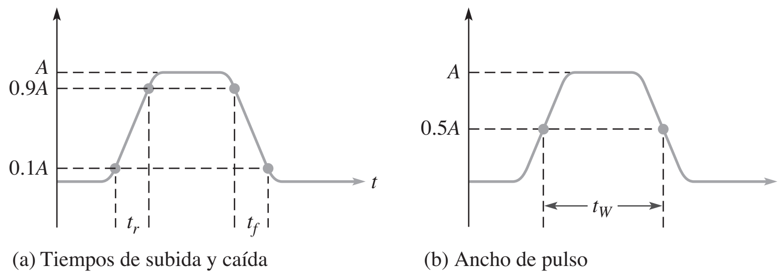
El intervalo de tiempo durante el borde de caída en el cual el pulso va de su valor más alto a su valor más bajo se llama *tiempo de caída*, t_f.

El tiempo de caída es el tiempo requerido para que el pulso vaya desde el 90 hasta el 10% de su amplitud.

El ancho de pulso, t_W, también requiere una definición precisa del pulso no ideal porque los bordes de subida y caída no son verticales.

El ancho de pulso es el tiempo transcurrido entre el punto ubicado sobre el borde de subida, donde el valor es del 50% de la amplitud, y el punto localizado en el borde de caída, donde el valor es del 50% de la amplitud.

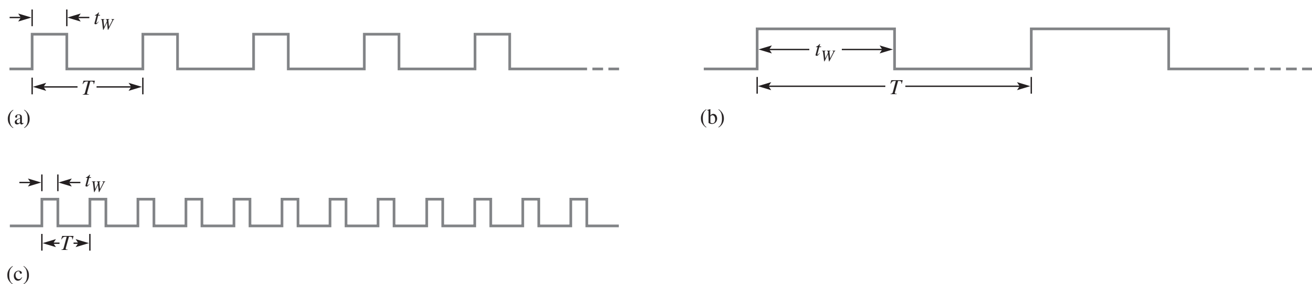
El ancho del pulso se muestra en la figura 11-50(b).



▲ **FIGURA 11–50**

Pulso no ideal.

Pulsos repetitivos Cualquier forma de onda que se repite a intervalos fijos es **periódica**. Algunos ejemplos de formas de onda pulsantes periódicas se muestran en la figura 11-51. Observe que, en cada caso, los pulsos se repiten a intervalos regulares. La rapidez a la que se repiten los pulsos es la **frecuencia de repetición de pulsos**, la cual es la frecuencia fundamental de la forma de onda. La frecuencia se expresa en hertz o en pulsos por segundo. El tiempo transcurrido desde un pulso hasta el punto correspondiente en el siguiente pulso es el periodo, T. La relación entre frecuencia y periodo es la misma que con la onda seno, $f = 1/T$.



▲ **FIGURA 11–51**

Formas de onda pulsantes repetitivas.

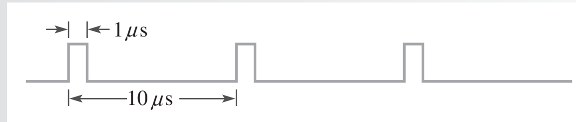
Una característica importante de las formas de onda pulsantes repetitivas es el ciclo de trabajo.

El ciclo de trabajo es la razón del ancho de pulso (t_W) al periodo (T), y por lo general se expresa como un porcentaje.

Ecuación 11–22

$$\text{ciclo de trabajo en porcentaje} = \left(\frac{t_W}{T}\right)100\%$$

EJEMPLO 11–17 Determine el periodo, la frecuencia y el ciclo de trabajo para la forma de onda pulsante de la figura 11-52.



▲ **FIGURA 11–52**

Solución

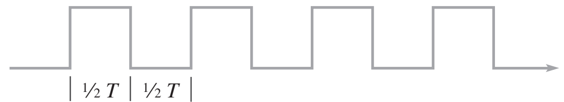
$$T = \mathbf{10\ \mu s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\ \mu\text{s}} = \mathbf{100\ kHz}$$

$$\text{ciclo de trabajo en porcentaje} = \left(\frac{1\ \mu\text{s}}{10\ \mu\text{s}}\right)100\% = \mathbf{10\%}$$

Problema relacionado Cierta forma de onda pulsante tiene frecuencia de 200 kHz y ancho de pulso de 0.25 μs. Determine el ciclo de trabajo.

Ondas cuadradas Una onda cuadrada es una forma de onda pulsante con un ciclo de trabajo del 50%. Por tanto, el ancho de pulso es igual a la mitad del periodo. En la figura 11-53 se muestra una onda cuadrada.



▲ **FIGURA 11–53**

Onda cuadrada.

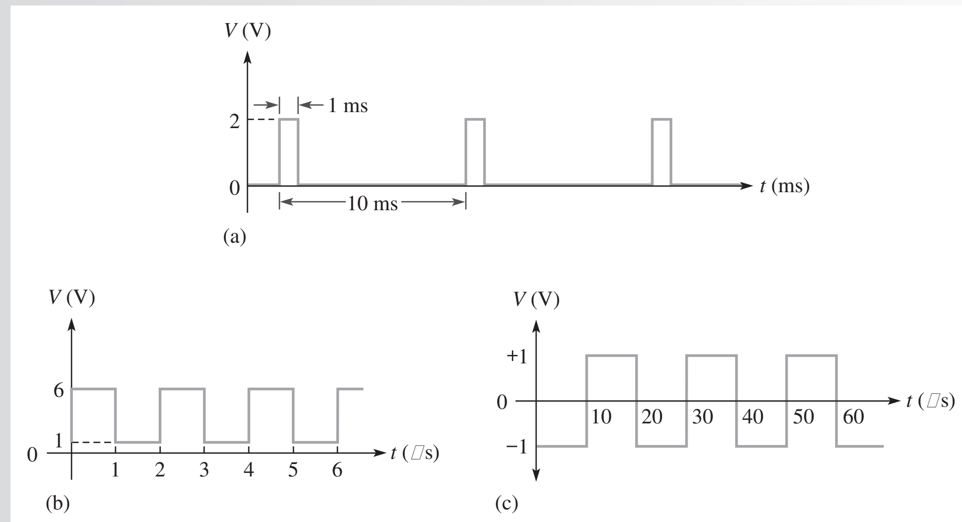
El valor promedio de una forma de onda pulsante El valor promedio (V_{prom}) de una forma de onda pulsante es igual al valor de línea de base más su ciclo de trabajo multiplicado por su amplitud. El nivel inferior de una forma de onda dirigida hacia positivo o el nivel superior de una forma de onda dirigida hacia negativo se considera como la línea de base. La fórmula es como sigue:

Ecuación 11–23

$$V_{prom} = \text{línea de base} + (\text{ciclo de trabajo})(\text{amplitud})$$

El ejemplo siguiente ilustra el cálculo del valor promedio.

EJEMPLO 11–18 Determine el valor promedio de cada una de las formas de onda de la figura 11-54.



▲ **FIGURA 11–54**

Solución En la figura 11-54(a), la línea de base está a 0 V, la amplitud es de 2 V, y el ciclo de trabajo es del 10%. El valor promedio es

$$V_{prom} = \text{línea de base} + (\text{ciclo de trabajo})(\text{amplitud})$$
$$= 0\text{ V} + (0.1)(2\text{ V}) = \mathbf{0.2\ V}$$

La forma de onda de la figura 11-54(b) tiene una línea de base de +1 V, amplitud de 5 V, y un ciclo de trabajo del 50%. El valor promedio es

$$V_{prom} = \text{línea de base} + (\text{ciclo de trabajo})(\text{amplitud})$$
$$= 1\text{ V} + (0.5)(5\text{ V}) = 1\text{ V} + 2.5\text{ V} = \mathbf{3.5\ V}$$

La figura 11-54(c) muestra una onda cuadrada con línea de base de –1 V y amplitud de 2 V. El valor promedio es

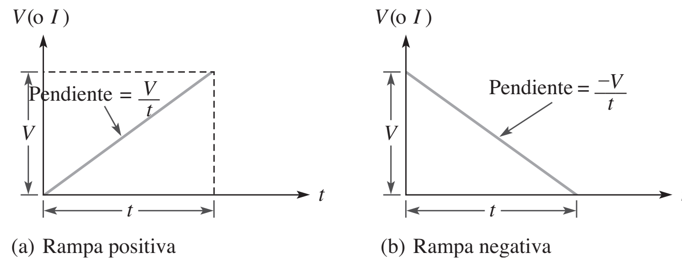
$$V_{prom} = \text{línea de base} + (\text{ciclo de trabajo})(\text{amplitud})$$
$$= -1\text{ V} + (0.5)(2\text{ V}) = -1\text{ V} + 1\text{ V} = \mathbf{0\ V}$$

Esta es una onda cuadrada alternante, y, como con una onda seno alternante, tiene un valor promedio de cero.

Problema relacionado Si la línea de base de la forma de onda de la figura 11-54(a) se desplaza a 1 V, ¿cuál es el valor promedio?

Formas de onda triangulares y diente de sierra

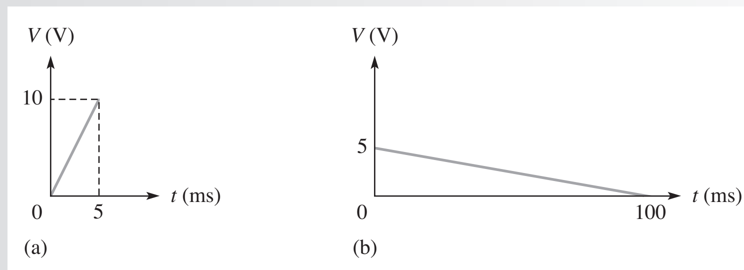
Las formas de onda triangulares y diente de sierra se forman por rampas de voltaje o corriente. Una **rampa** es un incremento o una reducción lineal del voltaje o de la corriente. La figura 11-55 muestra rampas tanto positivas como negativas. En la parte (a), la pendiente de la rampa es positiva; en la parte (b), la rampa tiene pendiente negativa. La pendiente de una rampa de voltaje es $\pm V/t$ y se expresa en unidades de V/s. La pendiente de una rampa de corriente es $\pm I/t$ y se expresa en unidades de A/s.



▲ FIGURA 11–55

Rampas.

EJEMPLO 11–19 ¿Cuáles son las pendientes de las rampas de voltaje en la figura 11-56?



▲ FIGURA 11–56

Solución En la figura 11-56(a), el voltaje se incrementa de 0 V a +10 V en 5 ms. Por tanto, $V = 10$ V y $t = 5$ ms. La pendiente es

$$\frac{V}{t} = \frac{10\text{ V}}{5\text{ ms}} = \mathbf{2\ V/ms}$$

En la figura 11-56(b), el voltaje se reduce desde +5 V hasta 0 V en 100 ms. Por tanto, $V = -5$ V y $t = 100$ ms. La pendiente es

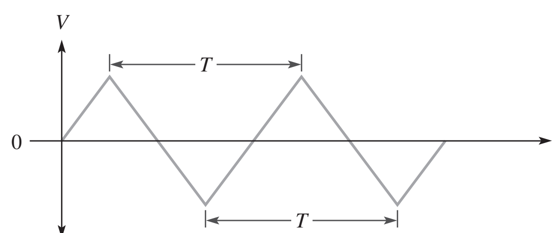
$$\frac{V}{t} = \frac{-5\text{ V}}{100\text{ ms}} = \mathbf{-0.05\ V/ms}$$

Problema relacionado Cierta rampa de voltaje tiene pendiente de +12 V/μs. Si la rampa comienza en cero, ¿cuál es el voltaje después de 0.01 ms?

Formas de onda triangulares La figura 11-57 muestra que una forma de **onda triangular** se compone de rampas positivas y negativas con pendientes iguales. El periodo de esta forma de on-

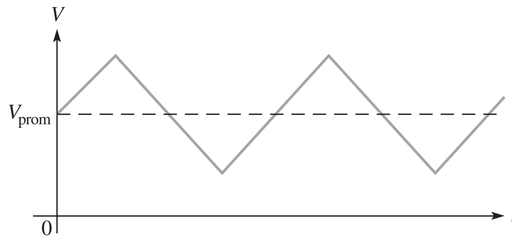
▶ FIGURA 11–57

Forma de onda triangular alternante con un valor promedio de cero.



da se mide de un pico al siguiente pico correspondiente, como se ilustra. La forma de onda triangular particular es alternante y su valor promedio es de cero.

La figura 11-58 describe una forma de onda triangular con valor promedio distinto de cero. La frecuencia de ondas triangulares se determina de igual modo que la de ondas seno, es decir, $f = 1/T$.

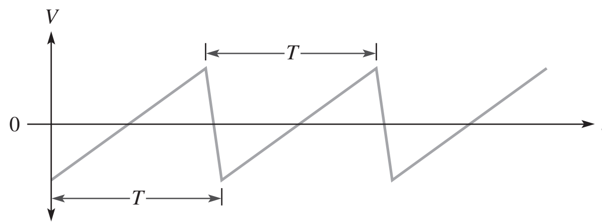


◀ **FIGURA 11–58**

Forma de onda triangular no alternante con un valor promedio distinto de cero.

Formas de onda diente de sierra La **forma de onda diente de sierra** es en realidad un caso especial de la onda triangular compuesta de dos rampas, una rampa tiene mucha más larga duración que la otra. Las formas de onda diente de sierra se utilizan en muchos sistemas electrónicos. Por ejemplo, el haz de electrones que barre de un lado a otro la pantalla de su receptor de televisión, y crea la imagen, es controlado por voltajes y corrientes diente de sierra. Una onda diente de sierra produce el movimiento horizontal del haz y la otra produce el movimiento vertical del mismo. A un voltaje diente de sierra en ocasiones se le llama *voltaje de barrido*.

La figura 11-59 es un ejemplo de una onda diente de sierra. Observe que consiste en una rampa dirigida a positivo de relativamente larga duración, seguida por una rampa dirigida a negativo de relativamente corta duración.



▲ **FIGURA 11–59**

Forma de onda diente de sierra alternante.

Armónicos

Una forma no sinusoidal repetitiva se compone de una frecuencia fundamental y de frecuencias armónicas. La **frecuencia fundamental** es la rapidez de repetición de la forma de onda, y los **armónicos** son las ondas seno de alta frecuencia que son múltiplos de la frecuencia fundamental.

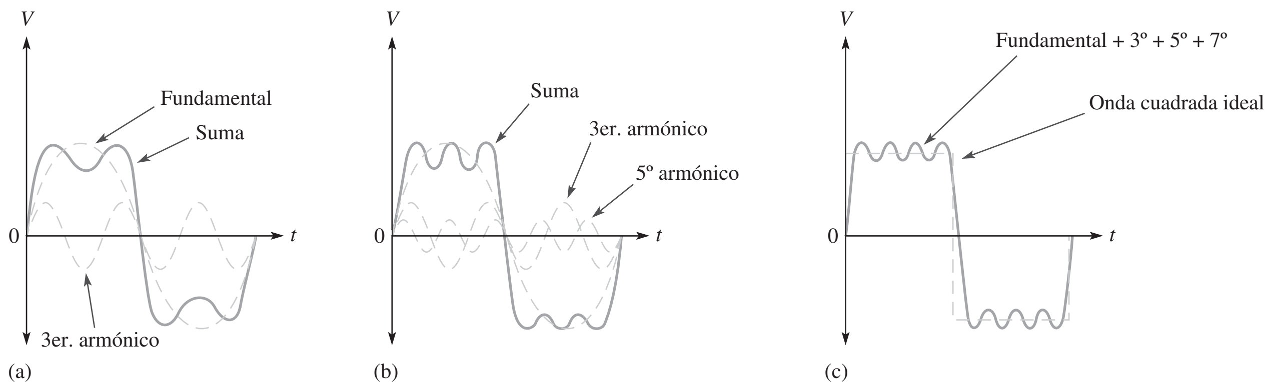
Armónicos impares Los *armónicos impares* son frecuencias que son múltiplos impares de la frecuencia fundamental de una forma de onda. Por ejemplo, una onda cuadrada de 1 kHz consta de una frecuencia fundamental de 1 kHz y de armónicos impares de 3 kHz, 5 kHz, 7 kHz, y así sucesivamente. La frecuencia de 3 kHz, en este caso, se llama tercer armónico, la frecuencia de 5 kHz es el quinto armónico, etcétera.

Armónicos pares Los *armónicos pares* son frecuencias que son múltiplos pares de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, cuando cierta onda tiene frecuencia fundamental de 200 Hz, el segundo armónico es de 400 Hz, el cuarto es de 800 Hz, el sexto de 1200 Hz, y así sucesivamente. Estos son armónicos pares.

Forma de onda compuesta Cualquier variación que se aparte de una onda seno pura produce armónicos. Una onda no sinusoidal se compone de la frecuencia fundamental y los armónicos. Algunos tipos de formas de onda sólo tienen armónicos impares, otros tienen solamente armónicos

pares, y algunos contienen ambas modalidades. El contenido armónico de una onda determina su forma. En general, únicamente la frecuencia fundamental y los primeros armónicos son de importancia significativa para determinar la forma de la onda.

Una onda cuadrada es ejemplo de una forma de onda compuesta por una frecuencia fundamental y sólo armónicos impares. Cuando los valores instantáneos de la frecuencia fundamental y de cada armónico impar se suman algebraicamente en cada punto, la curva resultante tendrá la forma de una onda cuadrada, como ilustra la figura 11-60. En la parte (a) de la figura, la frecuencia fundamental y el tercer armónico producen una forma de onda que comienza a parecerse a una onda cuadrada. En la parte (b), la frecuencia fundamental y el tercero y quinto armónicos proporcionan un parecido más cercano. Cuando se incluye el séptimo armónico, como en la parte (c), la forma de onda resultante se parece más a la onda cuadrada. Conforme se incluyen más armónicos, la onda cada vez se parece más a una onda cuadrada periódica.

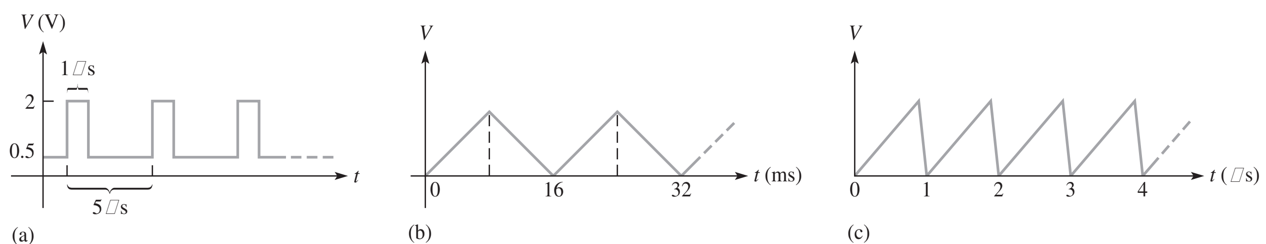


▲ **FIGURA 11–60**

Los armónicos impares producen una onda cuadrada.

REPASO DE LA SECCIÓN 11-9

1. Defina los siguientes parámetros:
   (a) tiempo de subida (b) tiempo de caída (c) ancho de pulso
2. En cierta forma de onda repetitiva, los pulsos ocurren una vez cada milisegundo. ¿Cuál es la frecuencia de esta forma de onda?
3. Determine el ciclo de trabajo, la amplitud y el valor promedio de la forma de onda mostrada en la figura 11-61(a).
4. ¿Cuál es el periodo de la onda triangular mostrada en la figura 11-61(b)?
5. ¿Cuál es la frecuencia de la onda diente de sierra mostrada en la figura 11-61(c)?



▲ **FIGURA 11–61**

6. Defina el término *frecuencia fundamental*.
7. ¿Cuál es el segundo armónico de una frecuencia fundamental de 1 kHz?
8. ¿Cuál es la frecuencia fundamental de una onda cuadrada cuyo periodo es de 10 μs?

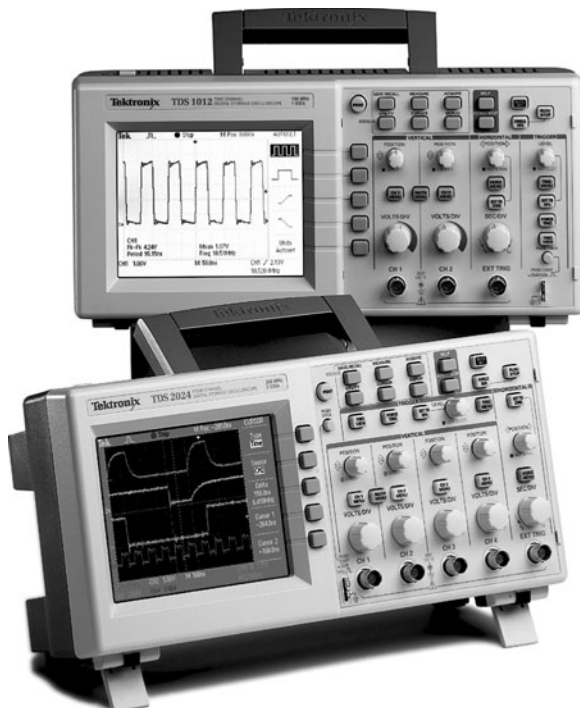
11–10 EL OSCILOSCOPIO

El osciloscopio es un instrumento de prueba ampliamente utilizado y muy versátil para observar y medir formas de onda.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar un osciloscopio para medir formas de onda**
  - Reconocer los controles de un osciloscopio común
  - Medir la amplitud de una forma de onda
  - Medir el periodo y la frecuencia de una forma de onda

El **osciloscopio** es básicamente un dispositivo de visualización que traza, en su pantalla, una gráfica de una señal eléctrica medida. En la mayoría de las aplicaciones, la gráfica muestra cómo cambian las señales con el tiempo. El eje vertical de la pantalla de visualización representa voltaje, y el eje horizontal representa tiempo. Se puede medir la amplitud, el periodo y la frecuencia de una señal por medio de un osciloscopio. Además, se puede determinar el ancho de pulso, el ciclo de trabajo, el tiempo de subida y el tiempo de caída de una forma de onda pulsante. La mayoría de los osciloscopios son capaces de mostrar en pantalla por lo menos dos señales a la vez, lo cual permite observar su relación de tiempo. En la figura 11-62 se muestran osciloscopios típicos.



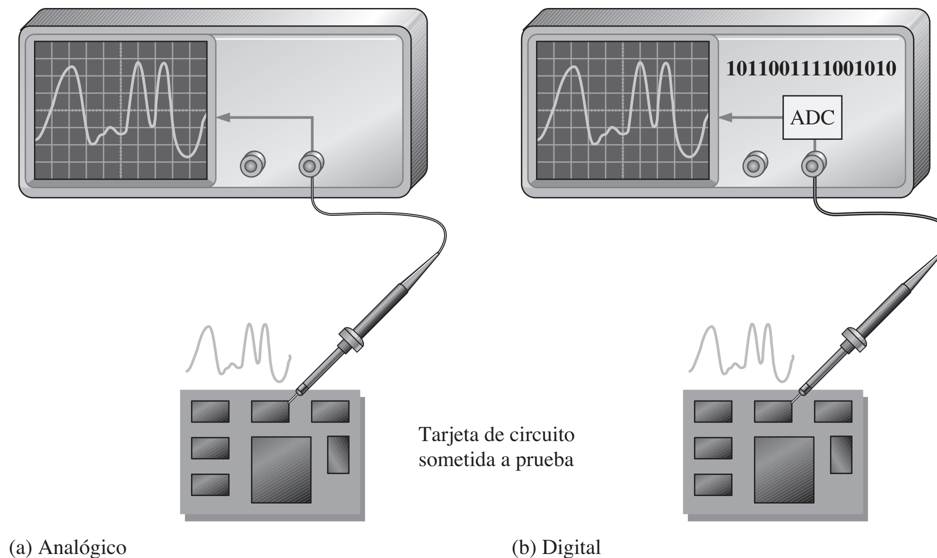
◀ FIGURA 11–62

Osciloscopios típicos. Copyright © Tektronix. Reproducidos con permiso.

Se pueden utilizar dos tipos básicos de osciloscopio, analógico y digital, para visualizar formas de onda digitales. Como ilustra la figura 11-63(a), el osciloscopio analógico funciona aplicando la forma de onda medida directamente para controlar el movimiento hacia arriba y hacia abajo del haz de electrones en el tubo de rayos catódicos (CRT, por sus siglas en inglés) conforme barre de uno a otro lado de la pantalla. Por consiguiente, el haz traza la forma de onda en la pantalla. Según muestra la figura 11-63(b), el osciloscopio digital convierte la forma de onda medida en información digital mediante un proceso de muestreo en un convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés). Luego se utiliza la información digital para reconstruir la formas de onda en la pantalla.

▶ **FIGURA 11–63**

Comparación de osciloscopios analógicos y digitales.

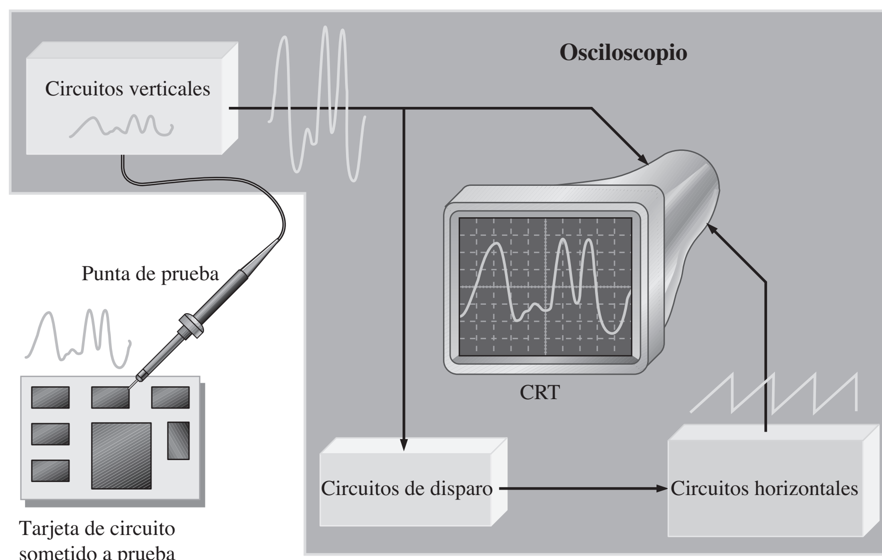


El osciloscopio digital se utiliza mucho más que el analógico. Sin embargo, uno u otro tipo puede ser utilizado en muchas aplicaciones; cada cual tiene características que lo hacen más adecuado en cierta situación. Un osciloscopio analógico muestra las formas de onda conforme ocurren en "tiempo real". Los osciloscopios digitales son útiles para medir pulsos transitorios que pueden ocurrir aleatoriamente o sólo una vez. Además, como en un osciloscopio digital la información sobre la forma de onda medida puede ser almacenada, es posible verla más tarde, imprimirla, o analizarla a fondo mediante una computadora u otros medios.

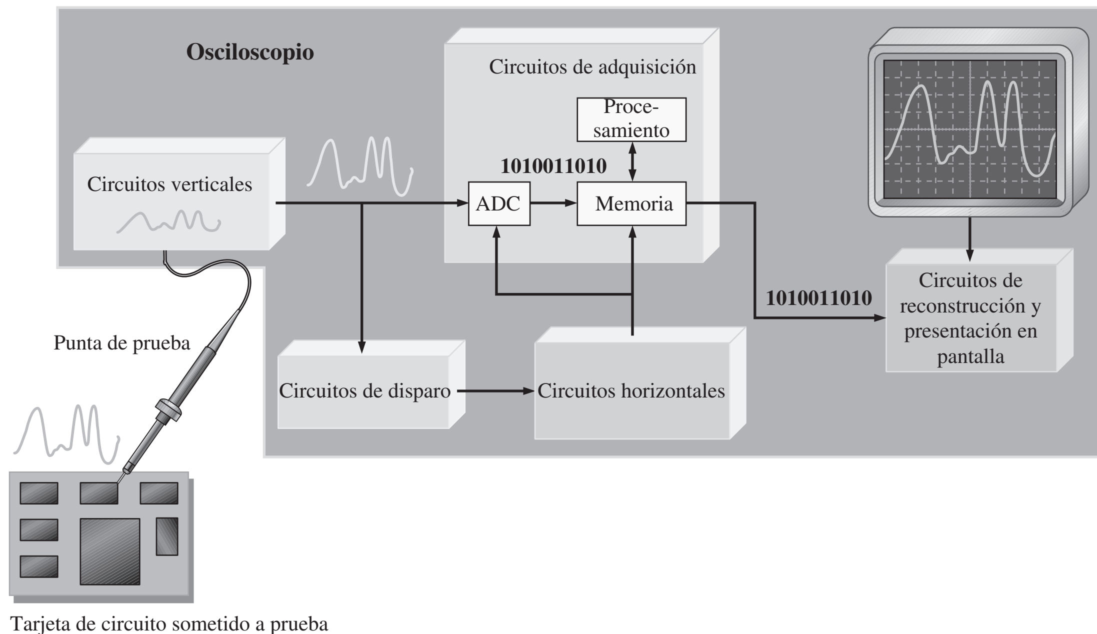
Operación básica de los osciloscopios analógicos Para medir un voltaje, se debe conectar una punta de prueba del osciloscopio al punto donde el voltaje está presente en un circuito. En general, se utiliza una punta de prueba ×10 que reduce (atenúa) la amplitud de la señal en diez. La señal pasa a través de la punta de prueba hacia los circuitos verticales donde es atenuada aún más, o amplificada según la amplitud real y dónde se ponga el control vertical del osciloscopio. Los circuitos verticales excitan entonces las placas deflectoras verticales del CRT. Asimismo, la señal se dirige hacia los circuitos de disparo que activan los circuitos horizontales para iniciar barridos horizontales repetitivos del haz de electrones de un lado al otro de la pantalla por medio de ondas diente de sierra. Ocurren muchos barridos por segundo, de modo que el haz parece formar una línea sólida de un lado al otro de la pantalla mediante la configuración de la forma de onda. Esta operación básica se ilustra en la figura 11-64.

▶ **FIGURA 11–64**

Diagrama de bloques de un osciloscopio analógico.



Operación básica de los osciloscopios digitales Algunas partes de un osciloscopio digital son similares a las del osciloscopio analógico. No obstante, el osciloscopio digital es más complejo que el analógico y, por lo general, tiene una pantalla de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés) en lugar de un CRT. Antes que mostrar una forma de onda en el momento que ocurre, el osciloscopio digital adquiere primero la forma de onda analógica medida y la convierte en forma digital por medio de un convertidor analógico a digital (ADC). Los datos digitales se guardan y procesan; luego se dirigen a los circuitos de reconstrucción y visualización para examinarlos en pantalla en su forma analógica original. La figura 11-65 muestra un diagrama de bloques básico para un osciloscopio digital.



▲ **FIGURA 11–65**

Diagrama de bloques de un osciloscopio digital.

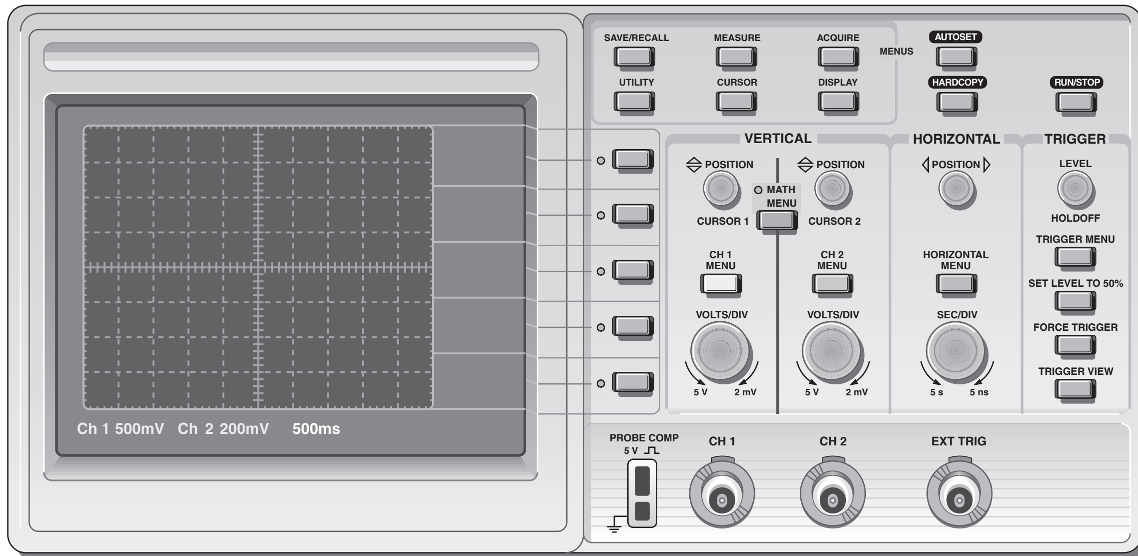
Controles del osciloscopio

En la figura 11-66 se muestra una vista del panel frontal de un osciloscopio de doble canal típico. Los instrumentos varían según el modelo y el fabricante, pero la mayoría tiene ciertas funciones comunes. Por ejemplo, las dos secciones verticales contienen un control de Posición, un botón de menú de canales, y un control Volts/Div. La sección horizontal contiene un control Sec/Div.

A continuación se describen algunos de los controles principales. Consulte el manual del usuario para conocer los detalles completos de su osciloscopio particular.

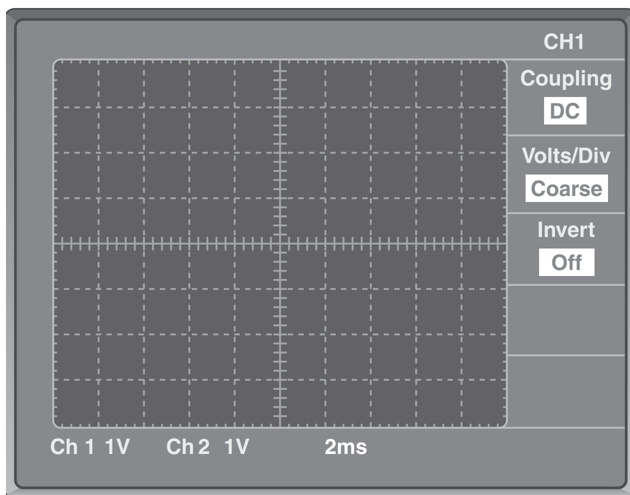
Controles verticales En la sección vertical del osciloscopio de la figura 11-66, hay controles idénticos para cada uno de los dos canales (CH1 y CH2). El control Position permite mover verticalmente una forma de onda hacia arriba o hacia abajo en la pantalla. El botón Menu permite seleccionar varios elementos que aparecen en la pantalla, tales como los modos de acoplamiento (de ca, de cd o tierra) y el ajuste fino o grueso del control Volts/Div, como se indica en la figura 11-67(a). El control Volts/Div ajusta el número de volts representados por cada división vertical en la pantalla. El ajuste de Volts/Div para cada canal aparece en la parte inferior de la pantalla. El botón Math Menu permite seleccionar las operaciones que pueden ser realizadas en las formas de onda de entrada, tales como la sustracción y adición de señales, según ilustra la figura 11-67(b).

Controles horizontales En la sección horizontal, los controles manejan ambos canales. El control Position permite mover horizontalmente una forma de onda hacia la izquierda o la dere-

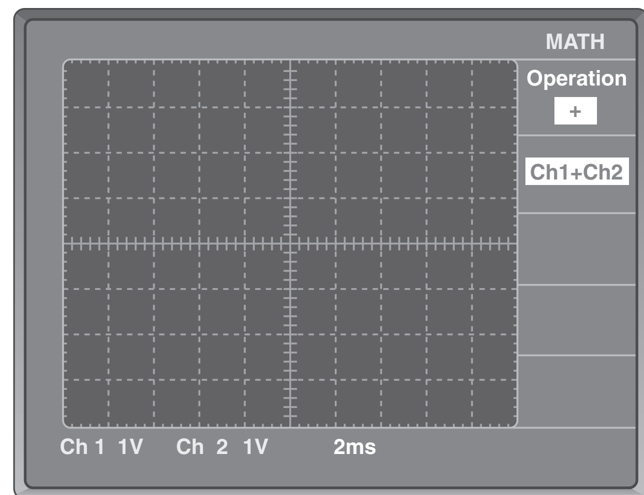


▲ **FIGURA 11–66**

Osciloscopio de dos canales típico. Los números debajo de la pantalla indican los valores de cada división en las escalas vertical (voltaje) y horizontal (tiempo), y pueden ser cambiados con los controles vertical y horizontal del osciloscopio.



(a) Ejemplo de selección en el menú “Channel”



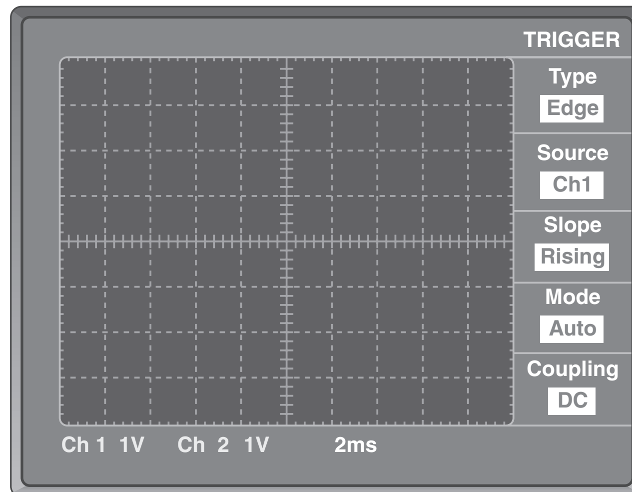
(b) Ejemplo de selección en el menú “Math”

▲ **FIGURA 11–67**

Pantallas de osciloscopio que muestran ejemplos de selecciones de menú.

cha en la pantalla. El botón Menu permite seleccionar varios elementos que aparecen en pantalla, tales como la base de tiempo principal, la vista ampliada de una parte de una forma de onda, y otros parámetros. El control Sec/Div ajusta el tiempo, el cual está representado por cada una de las divisiones horizontales o la base de tiempo principal. El ajuste Sec/Div aparece en la parte inferior de la pantalla.

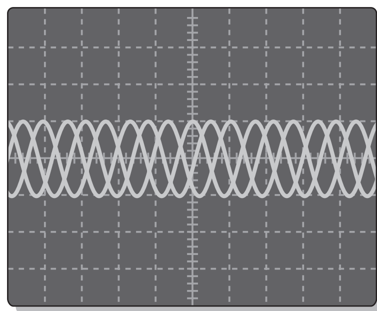
Controles de disparo En la sección Trigger, el control Level determina el punto sobre la forma de onda de disparo donde ocurre el disparo para iniciar el barrido y mostrar en pantalla las formas de onda de entrada. El botón Menu permite seleccionar varios elementos que aparecen en la pantalla, incluidos el borde o la pendiente de disparo, la fuente de disparo, el modo de disparo, y otros parámetros, como se muestra en la figura 11-68. También existe una entrada para una señal de disparo externa.



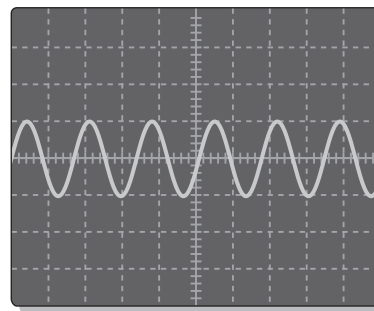
◀ **FIGURA 11–68**

Ejemplo de menú "Trigger".

La acción de disparo estabiliza una forma de onda en la pantalla y dispara apropiadamente un pulso que ocurre sólo una vez o al azar. También, permite observar demoras entre dos formas de onda. La figura 11-69 compara una señal disparada con una no disparada. La señal no disparada tiende a moverse a la deriva, de un lado a otro de la pantalla, y produce lo que parecen ser múltiples formas de onda.



(a) Imagen de forma de onda no disparada

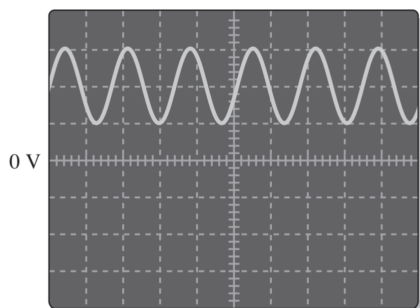


(b) Imagen de forma de onda disparada

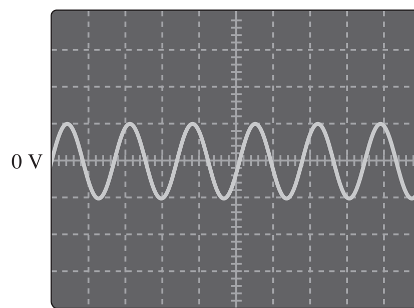
◀ **FIGURA 11–69**

Comparación de una forma de onda disparada y de una no disparada en un osciloscopio.

Acoplamiento de una señal al osciloscopio El método utilizado para conectar al osciloscopio una señal de voltaje a ser medido es el de acoplamiento. En el menú Vertical se seleccionan los modos de acoplamiento de CD y de CA. El acoplamiento CD permite que una forma de onda aparezca en pantalla incluido su componente de cd. El acoplamiento de CA bloquea el componente de cd de una señal, de modo que se ve la forma de onda centrada en 0 V. El modo Ground permite conectar la entrada de canal a tierra para ver dónde está localizada la referencia de 0 V en la pantalla. La figura 11-70 ilustra el resultado del acoplamiento de CD y de CA utilizando una forma de onda sinusoidal que tiene un componente de cd.



(a) Forma de onda de CD acoplada



(b) Forma de onda de CA acoplada

◀ **FIGURA 11–70**

Imágenes de la misma forma de onda que tiene un componente de CD.

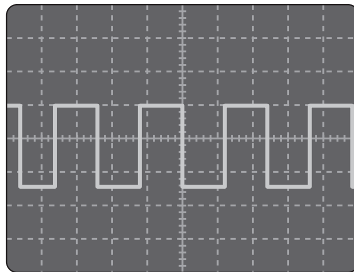
▶ **FIGURA 11–71**

Punta de prueba de voltaje de osciloscopio.

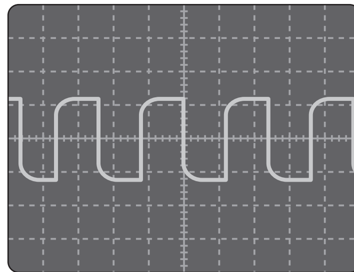


La punta de prueba de voltaje, mostrada en la figura 11-71, se utiliza para conectar una señal al osciloscopio. Como todos los instrumentos tienden a afectar el circuito que se va a medir debido al efecto de carga, la mayoría de las puntas de prueba del osciloscopio disponen de una alta resistencia en serie para reducir al mínimo los efectos de carga. Las puntas de prueba con una resistencia en serie diez veces más grande que la resistencia de entrada del osciloscopio se llaman puntas de prueba ×10 (por diez). Las puntas de prueba sin resistencia en serie se llaman sensores ×1 (por uno). El osciloscopio ajusta su calibración para atenuar el tipo de punta de prueba que se está utilizando. En la mayor parte de las mediciones, se deberá utilizar una punta de prueba ×10. Sin embargo, cuando se van a medir señales muy pequeñas, un ×1 puede ser la mejor opción.

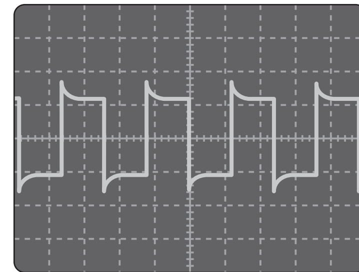
La punta de prueba tiene un ajuste que permite compensar la capacitancia de entrada del osciloscopio. Casi todos los osciloscopios disponen de una salida de compensación que proporciona una onda cuadrada calibrada para hacer la compensación. Antes de realizar una medición, debe asegurarse de que la punta de prueba esté compensada apropiadamente para eliminar cualquier distorsión introducida. Por lo general existe un tornillo u otro elemento para ajustar la compensación. La figura 11-72 muestra formas de onda en un osciloscopio para tres condiciones de la punta de prueba: compensada apropiadamente, subcompensada y sobrecompensada. Si la forma de onda aparece sobre o subcompensada, ajuste la punta de prueba hasta que aparezca una onda cuadrada compensada en forma correcta.



Compensado apropiadamente



Subcompensado



Sobrecompensado

▲ **FIGURA 11–72**

Condiciones de compensación de una punta de prueba.

EJEMPLO 11–20 Determine el valor pico a pico y el periodo de cada onda seno mostrada en la figura 11-73 a partir de las imágenes que aparecen en la pantalla del osciloscopio digital y de los ajustes para Volts/Div y Sec/Div, los cuales se muestran en la parte inferior de las pantallas. Las ondas seno están centradas verticalmente en las pantallas.

Solución Al examinar la escala vertical mostrada en la figura 11-73(a)

$$V_{pp} = 6\text{ divisiones} \times 0.5\text{ V/división} = \mathbf{3.0\ V}$$

En la escala horizontal (un ciclo abarca diez divisiones),

$$T = 10\text{ divisiones} \times 2\text{ ms/división} = \mathbf{20\ ms}$$

Al examinar la escala vertical mostrada en la figura 11-73(b),

$$V_{pp} = 5 \text{ divisiones} \times 50 \text{ mV/división} = \mathbf{250\ mV}$$

En la escala horizontal (un ciclo abarca seis divisiones),

$$T = 6 \text{ divisiones} \times 0.1 \text{ ms/división} = 0.6 \text{ ms} = \mathbf{600\ \mu s}$$

Al examinar la escala vertical mostrada en la figura 11-73(c),

$$V_{pp} = 6.8 \text{ divisiones} \times 2 \text{ V/división} = \mathbf{13.6\ V}$$

En la escala horizontal (la mitad de un ciclo abarca diez divisiones),

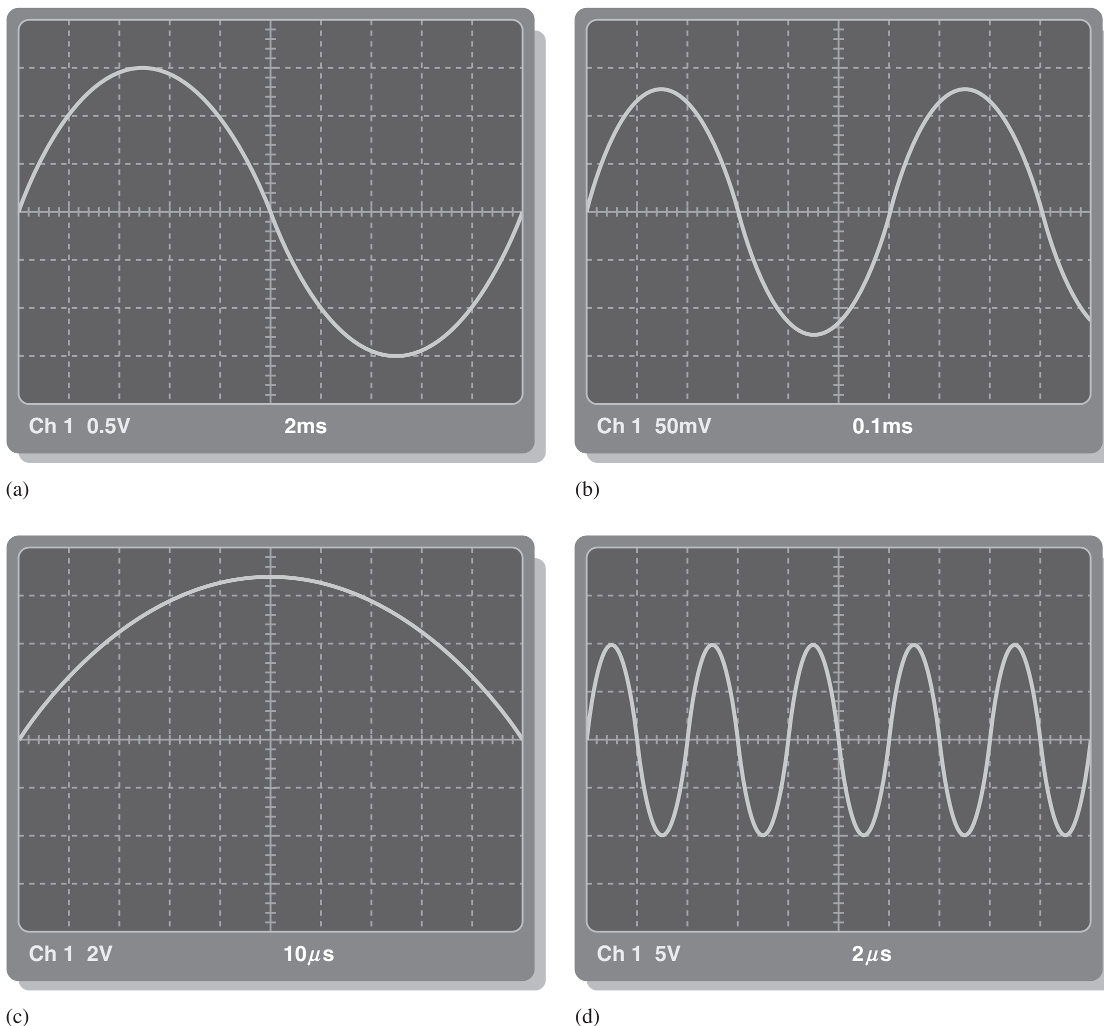
$$T = 20 \text{ divisiones} \times 10\ \mu\text{s/división} = \mathbf{200\ \mu s}$$

Al examinar la escala vertical mostrada en la figura 11-73(d),

$$V_{pp} = 4 \text{ divisiones} \times 5 \text{ V/división} = \mathbf{20\ V}$$

En la escala horizontal (un ciclo abarca dos divisiones),

$$T = 2 \text{ divisiones} \times 2\ \mu\text{s/división} = \mathbf{4\ \mu s}$$

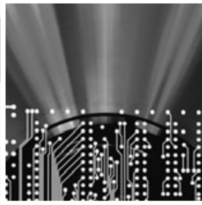


▲ **FIGURA 11–73**

Problema relacionado Determine el valor rms y la frecuencia de cada una de las formas de onda mostradas en la figura 11-73.

REPASO DE LA SECCIÓN 11-10

1. ¿Cuál es la diferencia principal entre un osciloscopio digital y uno analógico?
2. En la pantalla de un osciloscopio, ¿el voltaje se lee horizontal o verticalmente?
3. ¿Qué controla Volts/Div en un osciloscopio?
4. ¿Qué controla Sec/Div en un osciloscopio?
5. ¿Cuándo se deberá utilizar una punta de prueba $\times 10$ para medir voltaje?



Una aplicación de circuito

Como se aprendió en este capítulo, las formas de onda sinusoidales contienen una combinación de varias frecuencias armónicas. Cada uno de estos armónicos es una forma de onda sinusoidal que tiene cierta frecuencia. Algunas frecuencias sinusoidales son audibles; es decir, pueden ser escuchadas por el oído humano. Una sola frecuencia audible, u onda seno pura, se llama tono y, en general, queda comprendida dentro del intervalo de frecuencia de aproximadamente 300 Hz a 15 kHz. Cuando usted oye un tono reproducido en un altavoz, su sonoridad o volumen dependen de su amplitud de voltaje. Utilice su conocimiento de las características de la onda seno y de la operación de un osciloscopio para medir la frecuencia y la amplitud de señales en varios puntos de un receptor de radio básico.

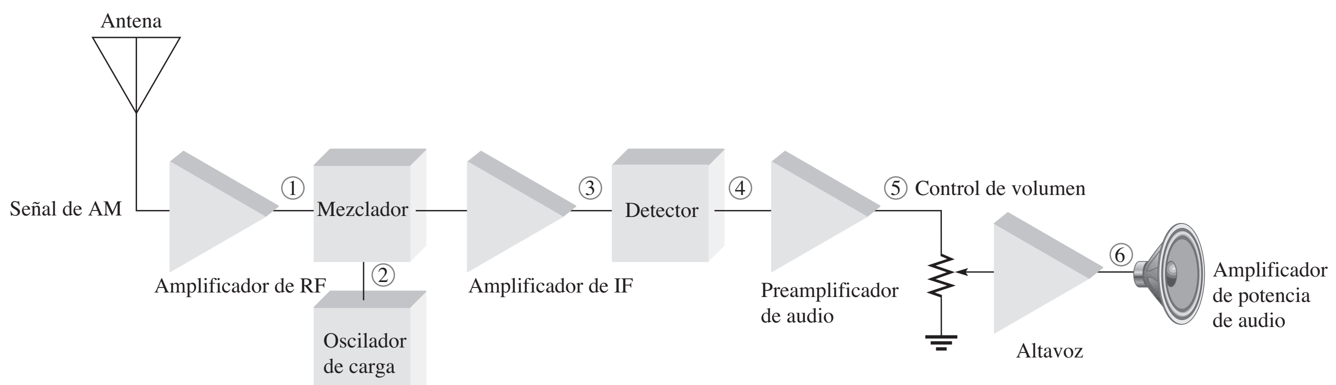
Las señales de voz y música que son captadas por un receptor de radio contienen muchas frecuencias armónicas con diferentes valores de voltaje. Una señal de voz o de música cambia continuamente, por lo que su contenido armónico también cambia. Sin embargo, si se transmite una frecuencia sinusoidal única y es captada por el receptor, se escuchará que del altavoz sale un tono constante.

Aunque, en este momento, usted no tiene los conocimientos para estudiar en detalle sistemas de amplificación y recepción, puede observar las señales en varios puntos del receptor. En la figura 11-74 se muestra un receptor de AM típico. AM significa amplitud modulada, un tema que será abordado en otro curso. La figura 11-75 ilustra cómo luce una señal de AM básica, y por ahora es todo lo que usted necesita saber. Como puede advertirse, la amplitud de la forma de onda sinusoidal está cambiando. La señal de radio frecuencia (RF) más alta se llama *portadora*, y su amplitud es variada y modulada mediante una señal de baja frecuencia, la cual es el audio (un tono en este caso). Normalmente, sin embargo, la señal de audio es una forma de onda compleja de voz o de música.

Mediciones con osciloscopio

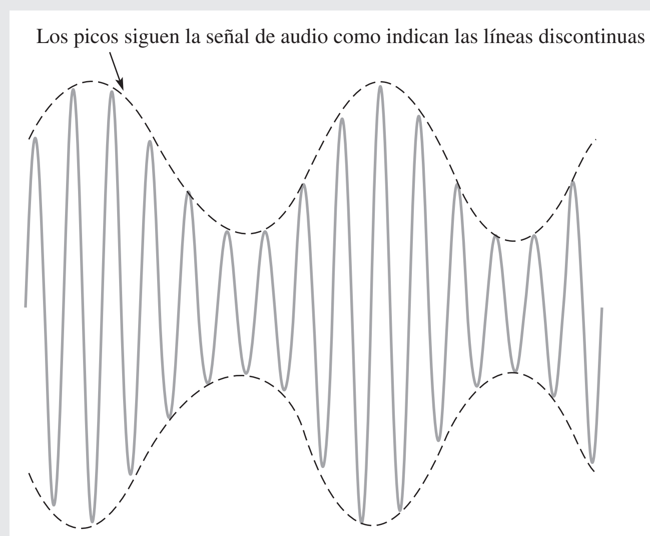
Las señales indicadas mediante números dentro de círculos en varios puntos de prueba en el diagrama de bloques del receptor mostrado en la figura 11-74 aparecen en la pantalla del osciloscopio en la figura 11-76, tal como se indica por medio de los mismos números dentro de los círculos correspondientes. En todos los casos, la forma de onda ilustrada en la parte superior de la pantalla es el canal 1 y la forma de onda de la parte inferior es el canal 2. Las lecturas que aparecen en la parte inferior de la pantalla muestran lecturas de ambos canales.

La señal en el punto 1 es una señal de AM, pero no se puede ver la variación de la amplitud a causa de la corta base de tiempo. La forma de onda está demasiado esparcida para ver la señal de audio moduladora, lo cual provoca variaciones en la amplitud; así que lo que se ve es exactamente un ciclo de la portadora. En el punto 3, la frecuencia portadora más alta es difícil de determinar



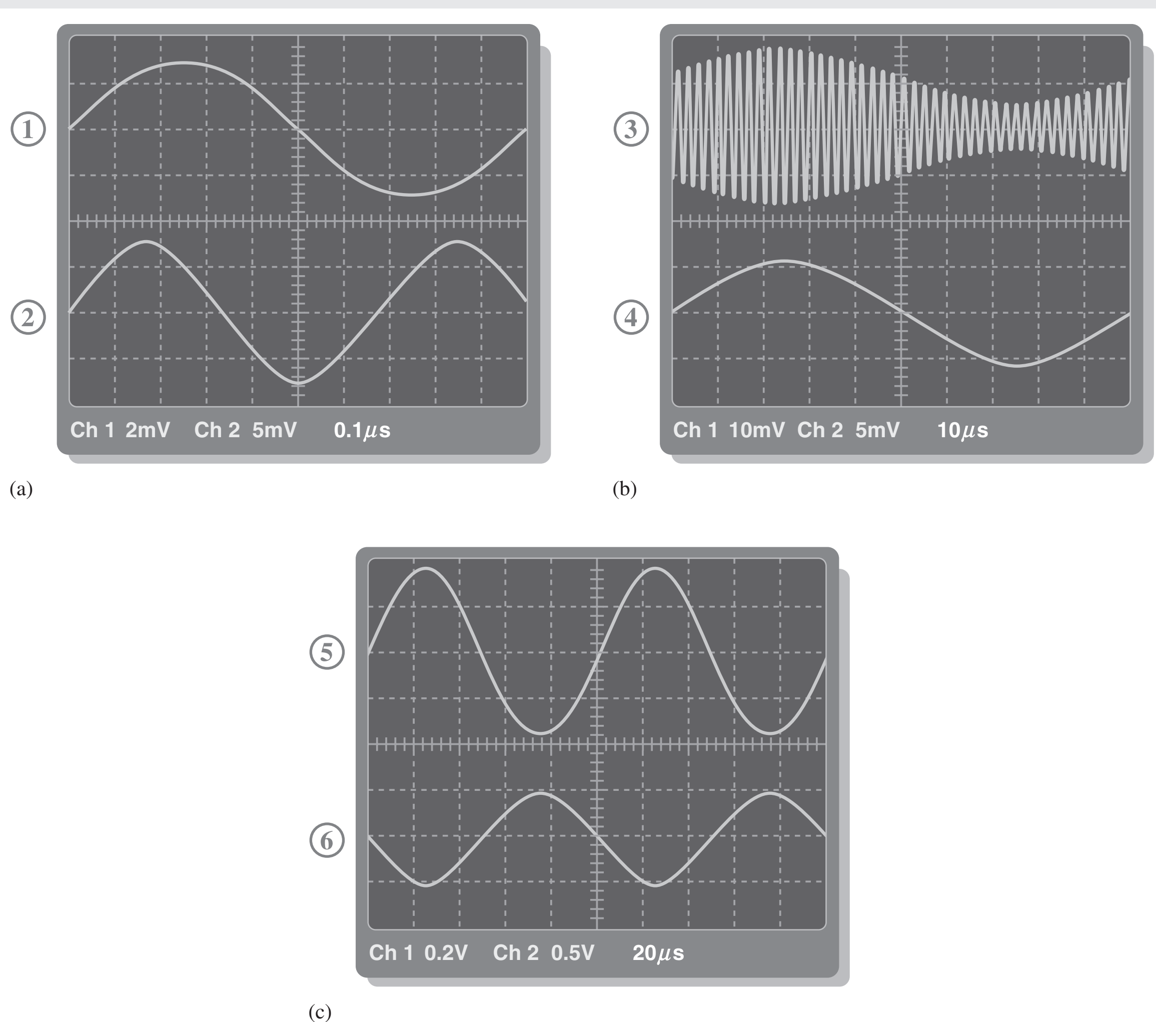
▲ **FIGURA 11–74**

Diagrama de bloques simplificado de un receptor de radio básico. Los números dentro de círculos representan puntos de prueba.



◀ **FIGURA 11–75**

Ejemplo de una señal de amplitud modulada (AM).



▲ **FIGURA 11–76**

Los números dentro de los círculos corresponden a los puntos de prueba numerados en la figura 11-74.

porque la base de tiempo se seleccionó para poder ver un ciclo completo de la señal moduladora. En un receptor de AM, esta frecuencia intermedia es de 455 kHz. En la práctica real, la señal portadora modulada en el punto 3 no es fácil de ver en el osciloscopio porque contiene dos frecuencias que la vuelven difícil de sincronizar para obtener un patrón estable. En ocasiones se utiliza activación externa o un campo de televisión para obtener una imagen estable. En este caso se muestra un patrón estable para ilustrar cómo se ve la forma de onda modulada.

- Para cada forma de onda mostrada en la figura 11-76, excepto en el punto 3, determine la frecuencia y el valor rms. La señal en el punto 4 es el tono modulador extraído por el detector de la frecuencia intermedia más alta (455 kHz).

Análisis del amplificador

- Todos los amplificadores de voltaje poseen una característica conocida como ganancia de voltaje. Ésta es la cantidad por la cual la amplitud de la señal de salida es más grande que la amplitud de la señal de entrada. Aplique esta definición y mediciones con un osciloscopio apropiado y determine la ganancia del preamplificador de audio en este receptor particular.
- Cuando una señal eléctrica es transformada en sonido por un altavoz, el volumen del sonido depende de la amplitud de la señal aplicada al altavoz. Basado en esto, explique cómo se utiliza el potenciómetro del control de volumen para ajustar el volumen del sonido, y determine la amplitud rms en el altavoz.

Repaso

1. ¿Qué significa RF?
2. ¿Qué significa IF?
3. ¿Cuál frecuencia es más alta, la portadora o la de audio?
4. ¿Cuál es la variable en una señal de AM dada?

RESUMEN

- La onda seno es una forma de onda periódica variable con el tiempo.
- La corriente alterna cambia de dirección en respuesta a cambios de la polaridad del voltaje de fuente.
- Un ciclo de una onda seno alterna consta de alternación positiva y alternación negativa.
- Dos fuentes comunes de ondas seno son el generador de ca electromagnético y el circuito oscilador electrónico.
- Un ciclo completo de una onda seno es de 360° o 2π radianes, un medio ciclo es de 180° o π radianes. Un cuarto de ciclo es de 90° o p/2 radianes.
- Un voltaje sinusoidal puede ser generado por un conductor que gira en un campo magnético.
- El ángulo de fase es la diferencia en grados o radianes entre una onda seno dada y una onda seno de referencia.
- La posición angular de un fasor representa el ángulo de la onda seno con respecto a una referencia de 0°, y la longitud o magnitud de un fasor representa la amplitud.
- Un pulso consiste en una transición desde un nivel de línea de base hasta un nivel de amplitud, seguido por una transición de retorno al nivel de línea de base.
- Una onda triangular o diente de sierra consta de rampas hacia positivo y rampas hacia negativo.
- Las frecuencias armónicas son múltiplos impares o pares de la rapidez de repetición de una forma de onda nosinusoidal.
- En la tabla 11-2 se resumen las conversiones de valores de onda seno.

▶ TABLA 11–2

PARA CAMBIAR DE	A	MULTIPLICAR POR
Pico	rms	0.707
Pico	Pico a pico	2
Pico	Promedio	0.637
rms	Pico	1.414
Pico a pico	Pico	0.5
Promedio	Pico	1.57

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas incluidos en el capítulo se encuentran en el glosario que aparece al final del libro.

Amplitud (A) Es el valor máximo de un voltaje o de una corriente.

Ancho de pulso (t_W) Para un pulso no ideal, tiempo entre puntos del 50% en los bordes de entrada y salida; intervalo de tiempo entre los escalones opuestos de un pulso ideal.

Armónicos Frecuencias contenidas en una forma de onda compuesta, las cuales son múltiplos enteros de la frecuencia de repetición del pulso (frecuencia fundamental).

Ciclo de trabajo Característica de una forma de onda pulsante que indica el porcentaje de tiempo que un pulso está presente durante un ciclo; relación de ancho de pulso a periodo expresada como fracción o como porcentaje.

Ciclo Repetición de una forma de onda periódica.

Fase Desplazamiento angular relativo de una forma de onda variable con el tiempo en términos de cuándo ocurre con respecto a una referencia.

Fasor Representación de una onda seno en función de su magnitud (amplitud) y dirección (ángulo de fase).

Forma de onda Patrón de variaciones de un voltaje o una corriente que muestra cómo cambia la cantidad con el tiempo.

Frecuencia (f) Medida de la rapidez de cambio de una función periódica; número de ciclos completos en 1 s. La unidad de frecuencia es el hertz.

Frecuencia fundamental Rapidez de repetición de una forma de onda.

Generador de funciones Instrumento que produce más de un tipo de forma de onda.

Grado Es la unidad de medición angular correspondiente a 1/360 de una revolución completa.

Hertz (Hz) La unidad de frecuencia. Un hertz es igual a un ciclo por segundo.

Onda seno Tipo de forma de onda que sigue un patrón cíclico sinusoidal definido por la fórmula $y = A \text{ sen } \theta$.

Oscilador Circuito electrónico que produce una señal cambiante con el tiempo, sin una señal de entrada externa, por medio de retroalimentación positiva.

Osciloscopio Instrumento de medición que muestra señales de formas de onda en una pantalla.

Periódico Fenómeno caracterizado por una repetición a intervalos de tiempo fijos.

Periodo (T) Es el intervalo de tiempo de un ciclo completo de una forma de onda periódica.

Pulso Es un tipo de forma de onda compuesta por dos escalones iguales y opuestos de voltaje o corriente separados por cierto intervalo de tiempo.

Radián Unidad de medición angular. Hay 2π radianes en una revolución completa de 360°. Un radián es igual a 57.3°.

Rampa Tipo de forma de onda caracterizado por un incremento o una reducción lineal de voltaje o de corriente.

Tiempo de caída (t_f) Intervalo de tiempo requerido para que un pulso cambie del 90 al 10% de su amplitud.

Tiempo de subida (t_r) Es el tiempo requerido para que un pulso cambie del 10 al 90% de su amplitud.

Valor instantáneo El valor de voltaje o de corriente de una forma de onda en un instante dado.

Valor pico El valor de voltaje o de corriente de una forma de onda en sus puntos positivos o negativos máximos.

Valor pico a pico El valor de voltaje o de corriente de una forma de onda medido desde su punto mínimo hasta su punto máximo.

Valor promedio El promedio de una onda seno en medio ciclo. Es 0.637 multiplicado por el valor pico.

Valor rms Es el valor de un voltaje sinusoidal que indica su efecto de calentamiento, también es conocido como valor efectivo. Es igual a 0.707 veces el valor pico, *rms* significa raíz cuadrada de la media de los cuadrados.

Velocidad angular Es la velocidad de rotación de un fasor que está relacionado con la frecuencia de la onda seno que representa.

FÓRMULAS

11–1	$f = \dfrac{1}{T}$	Frecuencia
11–2	$T = \dfrac{1}{f}$	Periodo
11–3	$f =$ **(números de pares de polos)(rps)**	Frecuencia de salida de un generador

11–4	$V_{pp} = 2V_p$	Voltaje pico a pico (onda seno)
11–5	$I_{pp} = 2I_p$	Corriente pico a pico (onda seno)
11–6	$V_{rms} = 0.707V_p$	Voltaje de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados (onda seno)
11–7	$I_{rms} = 0.707I_p$	Corriente de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados (onda seno)
11–8	$V_p = 1.414V_{rms}$	Voltaje pico (onda seno)
11–9	$I_p = 1.414I_{rms}$	Corriente pico (onda seno)
11–10	$V_{pp} = 2.828V_{rms}$	Voltaje pico a pico (onda seno)
11–11	$I_{pp} = 2.828I_{rms}$	Corriente pico a pico (onda seno)
11–12	$V_{prom} = 0.637V_p$	Voltaje promedio en medio ciclo (onda seno)
11–13	$I_{prom} = 0.637I_p$	Corriente promedio en medio ciclo (onda seno)
11–14	$\text{rad} = \left(\frac{\pi\ \text{rad}}{180°}\right) \times \text{grados}$	Conversión de grados a radianes
11–15	$\text{grados} = \left(\frac{180°}{\pi\ \text{rad}}\right) \times \text{rad}$	Conversión de radianes a grados
11–16	$y = A \operatorname{sen} \theta$	Fórmula general de la onda seno
11–17	$y = A \operatorname{sen}(\theta - \phi)$	Onda seno detrás de la referencia
11–18	$y = A \operatorname{sen}(\theta + \phi)$	Onda seno adelante de la referencia
11–19	$\omega = 2\pi f$	Velocidad angular
11–20	$\theta = \omega t$	Ángulo de fase
11–21	$v = V_p \operatorname{sen} 2\pi ft$	Voltaje de onda seno
11–22	$\text{ciclo de trabajo en porcentaje} = \left(\frac{t_W}{T}\right)100\%$	Ciclo de trabajo
11–23	$V_{prom} = \text{línea de base} + (\text{ciclo de trabajo})(\text{amplitud})$	Valor promedio de una forma de onda pulsante

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. La diferencia entre corriente alterna (ca) y corriente directa (cd) es
(a) la corriente alterna cambia de valor, y la corriente directa no
(b) la corriente alterna cambia de dirección, y la corriente directa no
(c) ambas respuestas (a) y (b)
(d) ni la respuesta (a) ni la (b)

2. Durante cada ciclo, una onda seno alcanza un valor pico
(a) una vez **(b)** dos veces
(c) cuatro veces **(d)** un número de veces que depende de la frecuencia

3. Una onda seno con frecuencia de 12 kHz cambia más rápido que una onda seno con frecuencia de
(a) 20 kHz **(b)** 15,000 Hz **(c)** 10,000 Hz **(d)** 1.25 MHz

4. Una onda seno con un periodo de 2 ms cambia más rápido que una onda seno con un periodo de
(a) 1 ms **(b)** 0.0025 s **(c)** 1.5 ms **(d)** 1200 ms

5. Cuando una onda seno tiene una frecuencia de 60 Hz, en 10 s realiza
(a) 6 ciclos **(b)** 10 ciclos **(c)** 1/16 de ciclo **(d)** 600 ciclos

6. Si el valor pico de una onda seno es de 10 V, el valor pico a pico es de
(a) 20 V **(b)** 5 V **(c)** 100 V **(d)** ninguno de estos

7. Si el valor pico de una onda seno es de 20 V, el valor rms es
(a) 14.14 V **(b)** 6.37 V **(c)** 7.07 V **(d)** 0.707 V

8. El valor promedio de una onda seno pico de 10 V en un ciclo completo es de
(a) 0 V **(b)** 6.37 V **(c)** 7.07 V **(d)** 5 V

9. El valor promedio en medio ciclo de una onda seno con valor pico de 20 V es de
(a) 0 V **(b)** 6.37 V **(c)** 12.74 V **(d)** 14.14 V

10. Una onda seno tiene un cruce por cero y va dirigida hacia positivo en 10° y otra onda seno con cruce por cero va dirigida hacia negativo en 45°. El ángulo de fase entre las dos formas de onda es de

(a) 55° **(b)** 35° **(c)** 0° **(d)** ninguno de estos

11. El valor instantáneo de una onda seno pico de 15 A en un punto localizado a 32° de su cruce por cero hacia positivo es de

(a) 7.95 A **(b)** 7.5 A **(c)** 2.13 A **(d)** 7.95 V

12. Un fasor representa

(a) la magnitud de una cantidad **(b)** magnitud y dirección de una cantidad

(c) el ángulo de fase **(d)** la longitud de una cantidad

13. Si la corriente rms a través de un resistor de 10 kΩ es de 5 mA, la caída de voltaje rms del resistor es de

(a) 70.7 V **(b)** 7.07 V **(c)** 5 V **(d)** 50 V

14. Se conectan dos resistores en serie a una fuente de ca. Si hay 6.5 V rms entre los extremos de un resistor y 3.2 V rms entre los extremos del otro, el voltaje de fuente pico es de

(a) 9.7 V **(b)** 9.19 V **(c)** 13.72 V **(d)** 4.53 V

15. Una forma de onda pulsante de 10 kHz se compone de pulsos de 10 μs de ancho. Su ciclo de trabajo es

(a) 100% **(b)** 10% **(c)** 1% **(d)** no determinable

16. El ciclo de trabajo de una onda cuadrada

(a) varía con la frecuencia **(b)** varía con el ancho de pulso

(c) ambas respuestas (a) y (b) **(d)** es del 50%

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 11-81.

1. Si el voltaje de fuente se incrementa, el voltaje entre los extremos de R_3

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

2. Si R_4 se abre, el voltaje entre los extremos de R_3

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

3. Si el valor promedio de medio ciclo del voltaje de fuente disminuye, el voltaje rms entre los extremos de R_2

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 11-83.

4. Si el voltaje de cd se reduce, la corriente promedio a través de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

5. Si la fuente de voltaje de cd se invierte, la corriente rms a través de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 11-90.

6. Si el resistor localizado en la esquina superior izquierda de la tarjeta prototipo tiene un código de colores de azul, gris, café, oro en lugar de las bandas de color mostradas, el voltaje CH2 medido por el osciloscopio

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

7. Si la punta de prueba CH2 mostrada que está conectado al lado derecho del resistor se mueve hacia el lado izquierdo del resistor, la amplitud del voltaje medido

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

8. Si la terminal inferior del resistor situado más a la derecha se desconecta, el voltaje CH2

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

9. Si el alambre que conecta los dos resistores localizados en la parte superior se desconecta y ello modifica el efecto de carga en la fuente de la señal de entrada, el voltaje CH1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 11-91.

10. Si el resistor situado más a la derecha tiene una tercera banda naranja en lugar de una roja, el voltaje CH1

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

11. Si el resistor de la esquina superior izquierda se abre, el voltaje CH1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

12. Si el resistor de la esquina inferior izquierda se abre, el voltaje CH1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

Un asterisco (*) indica los problemas más difíciles.
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 11–1 La forma de onda sinusoidal

1. Calcule la frecuencia con cada uno de los siguientes valores de periodo:

(a) 1 s **(b)** 0.2 s **(c)** 50 ms **(d)** 1 ms **(e)** 500 μs **(f)** 10 μs

2. Calcule el periodo de cada uno de los siguientes valores de frecuencia:

(a) 1 Hz **(b)** 60 Hz **(c)** 500 Hz **(d)** 1 kHz **(e)** 200 kHz **(f)** 5 MHz

3. Una onda seno realiza 5 ciclos en 10 μs. ¿Cuál es su periodo?

4. Una onda seno tiene frecuencia de 50 kHz. ¿Cuántos ciclos completa en 10 ms?

SECCIÓN 11–2 Fuentes de voltaje sinusoidal

5. La espira conductora del rotor de un generador monofásico de dos polos gira a 250 rps. ¿Cuál es la frecuencia del voltaje de salida inducido?

6. Cierto generador de cuatro polos gira a 3600 rpm. ¿Cuál es la frecuencia del voltaje que produce?

7. ¿A qué rapidez de rotación debe ser operado un generador de cuatro polos para producir un voltaje sinusoidal de 400 Hz?

SECCIÓN 11–3 Valores sinusoidales de voltaje y corriente

8. El valor pico de una onda seno es de 12 V. Determine los siguientes valores:

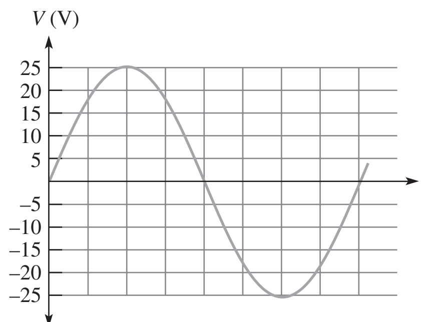
(a) rms **(b)** pico a pico **(c)** promedio

9. El valor rms de una corriente sinusoidal es de 5 mA. Determine los siguientes valores:

(a) pico **(b)** promedio **(c)** pico a pico

10. Para la onda seno de la figura 11-77, determine los valores pico, pico a pico, rms y promedio.

▶ FIGURA 11–77



SECCIÓN 11–4 Medición angular de una onda seno

11. Transforme los siguientes valores angulares de grados a radianes:

(a) 30° **(b)** 45° **(c)** 78° **(d)** 135° **(e)** 200° **(f)** 300°

12. Cambie los siguientes valores angulares de radianes a grados:

(a) $\pi/8$ rad **(b)** $\pi/3$ rad **(c)** $\pi/2$ rad

(d) $3\pi/5$ rad **(e)** $6\pi/5$ rad **(f)** 1.8π rad

13. Una onda seno *A* tiene un cruce por cero hacia positivo en 30°. La onda seno *B* tiene un cruce por cero hacia positivo en 45°. Determine el ángulo de fase que hay entre las dos señales. ¿Cuál señal es la que se adelanta?

14. Una onda seno tiene un pico positivo en 75° y otro con un pico positivo en 100°. ¿Cuánto se desfasa cada onda seno con respecto a la referencia de 0°? ¿Cuál es el ángulo de fase entre estas ondas?

15. Trace un bosquejo de dos ondas seno como sigue: la onda seno *A* es la referencia y la onda seno *B* se retrasa 90° con respecto a la *A*. Ambas ondas tienen amplitudes iguales.

SECCIÓN 11–5 La fórmula de la onda seno

16. Cierta onda seno tiene un cruce por cero hacia positivo en 0° y valor rms de 20 V. Calcule su valor instantáneo en cada uno de los siguientes ángulos:

(a) 15° **(b)** 33° **(c)** 50° **(d)** 110°

(e) 70° **(f)** 145° **(g)** 250° **(h)** 325°

17. Para una corriente sinusoidal particular referida a 0°, el valor pico es de 100 mA. Determine el valor instantáneo en cada uno de los siguientes puntos:

(a) 35° **(b)** 95° **(c)** 190° **(d)** 215° **(e)** 275° **(f)** 360°

18. Para una onda seno referida a 0° con valor rms de 6.37 V, determine el valor instantáneo en cada uno de los puntos siguientes:

(a) $\pi/8$ rad **(b)** $\pi/4$ rad **(c)** $\pi/2$ rad **(d)** $3\pi/4$ rad

(e) π rad **(f)** $3\pi/2$ rad **(g)** 2π rad

19. La onda seno *A* tiene 30° de retraso con respecto a la onda seno *B*. Ambas tienen valores pico de 15 V. La onda seno *A* es la referencia con un cruce por cero hacia positivo en 0°. Determine el valor instantáneo de la onda seno *B* en 30°, 45°, 90°, 180°, 200°, y 300°.

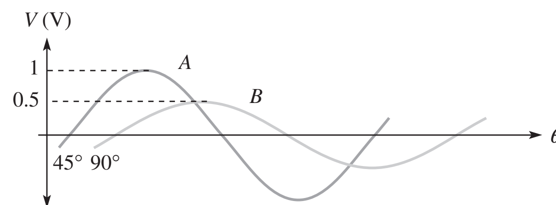
20. Repita el problema 19 para el caso en que la onda seno *A* va 30° delante de la onda seno *B*.

***21.** Cierta onda seno tiene frecuencia de 2.2 kHz y valor rms de 25 V. Suponiendo que se inicia una ciclo dado (cruce por cero) en el instante $t = 0$ s, ¿cuál es el cambio de voltaje desde 0.12 ms hasta 0.2 ms?

SECCIÓN 11–6 Introducción a los fasores

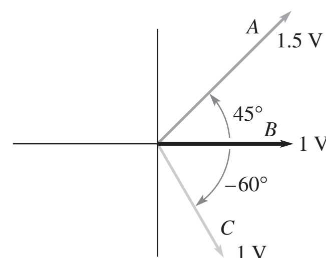
22. Trace un diagrama fasorial para representar las ondas seno de la figura 11-78 con respecto a la referencia de 0°.

▶ FIGURA 11–78



23. Trace las ondas seno representadas por el diagrama fasorial de la figura 11-79. Las longitudes del fasor representan valores pico.

▶ FIGURA 11–79



24. Determine la frecuencia para cada velocidad angular:

(a) 60 rad/s **(b)** 360 rad/s **(c)** 2 rad/s **(d)** 1256 rad/s

25. Determine el valor de la onda seno *A* mostrada en la figura 11-78 en cada uno de los tiempos siguientes, medido a partir del cruce por cero hacia positivo. Suponga una frecuencia de 5 kHz.

(a) 30 μs **(b)** 75 μs **(c)** 125 μs

SECCIÓN 11–7 Análisis de circuitos de ca

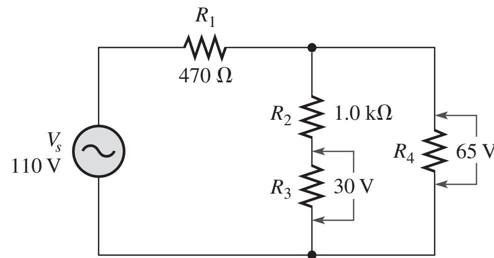
26. Se aplica un voltaje sinusoidal al circuito resistivo de la figura 11-80. Determine los valores siguientes:

(a) I_{rms} **(b)** I_{prom} **(c)** I_p **(d)** I_{pp} **(e)** i en el pico positivo



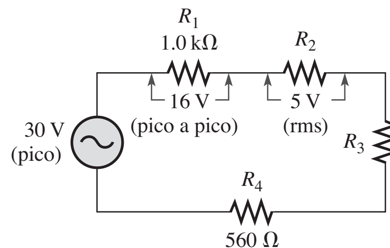
▲ FIGURA 11–80

27. Encuentre los valores promedio en medio ciclo de los voltajes presentes entre los extremos de R_1 y R_2 en la figura 11-81. Todos los valores mostrados son rms.



▲ FIGURA 11–81

28. Determine el voltaje rms entre los extremos de R_3 en la figura 11-82.



▲ FIGURA 11–82

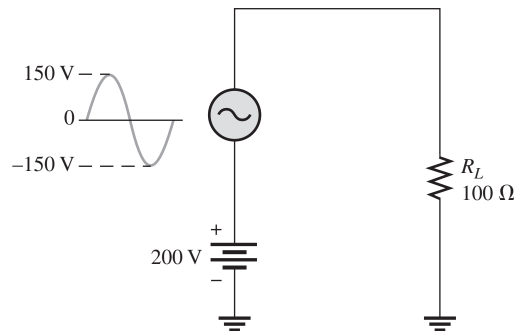
SECCIÓN 11–8 Voltajes superpuestos de cd y de ca

29. Una onda seno con valor rms de 10.6 V aparece montada sobre un nivel de cd de 24 V. ¿Cuáles son los valores máximo y mínimo de la forma de onda resultante?

30. ¿Cuánto voltaje de cd se debe agregar a una onda seno de 3 V rms para hacer el voltaje resultante no alterno (valores negativos)?

31. Una onda pico de 6 V aparece montada en un voltaje de cd de 8 V. Si el voltaje de cd se reduce a 5 V, ¿qué tan negativa llegaría a ser la onda seno?

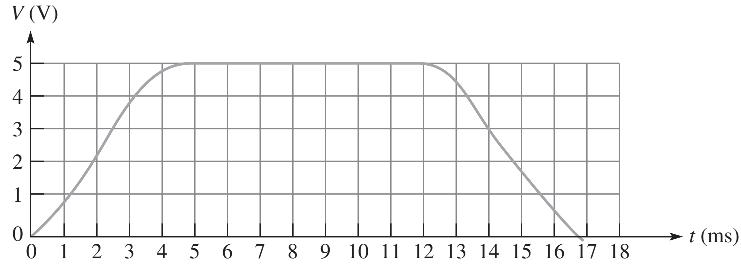
* **32.** La figura 11-83 muestra una fuente de voltaje sinusoidal dispuesta en serie con una fuente de cd. Efectivamente, los dos voltajes están superpuestos. Determine la disipación de potencia en el resistor de carga.



▲ **FIGURA 11–83**

SECCIÓN 11–9 Formas de onda no sinusoidales

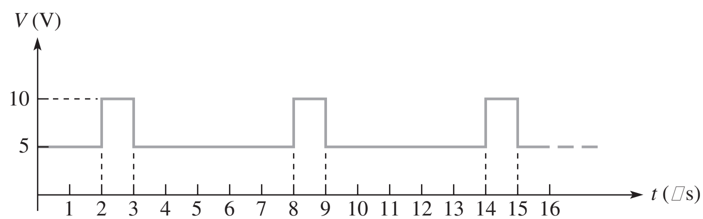
33. Con la gráfica de la figura 11-84, determine los valores aproximados de t_r, t_f, t_W, y la amplitud.



▲ **FIGURA 11–84**

34. La frecuencia de repetición de una forma de onda pulsante es de 2 kHz, y el ancho de pulso es de 1 μs. ¿Cuál es el ciclo de trabajo en porcentaje?

35. Calcule el valor promedio de la forma de onda pulsante mostrada en la figura 11-85.

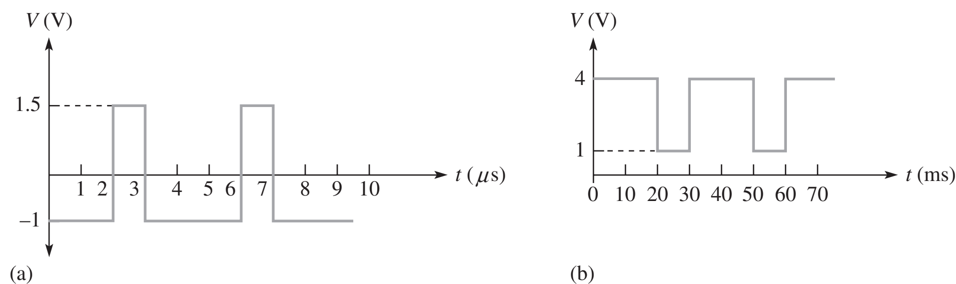


▲ **FIGURA 11–85**

36. Determine el ciclo de trabajo de cada una de las formas de onda mostradas en la figura 11-86.

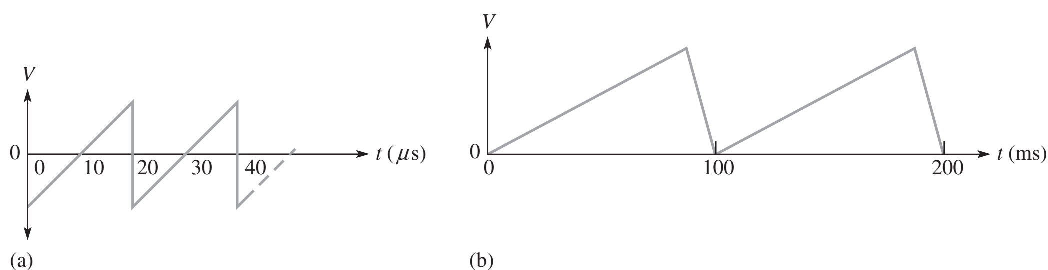
37. Determine el valor promedio de cada forma de onda pulsante mostrada en la figura 11-86.

38. ¿Cuál es la frecuencia de cada una de las formas de onda mostradas en la figura 11-86?



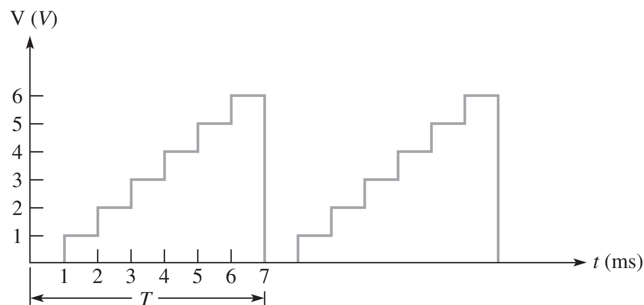
▲ **FIGURA 11–86**

39. ¿Cuál es la frecuencia de cada forma de onda diente de sierra mostrada en la figura 11-87?



▲ **FIGURA 11–87**

* **40.** Una forma de onda no sinusoidal llamada *escalonada* se muestra en la figura 11-88. Determine su valor promedio.



▲ **FIGURA 11–88**

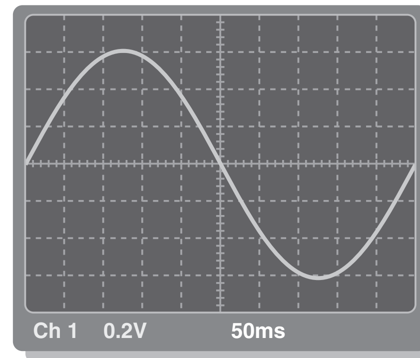
41. El periodo de una onda cuadrada es de 40 μs. Haga una lista con los seis primeros armónicos impares.

42. ¿Cuál es la frecuencia fundamental de la onda cuadrada mencionada en el problema 41?

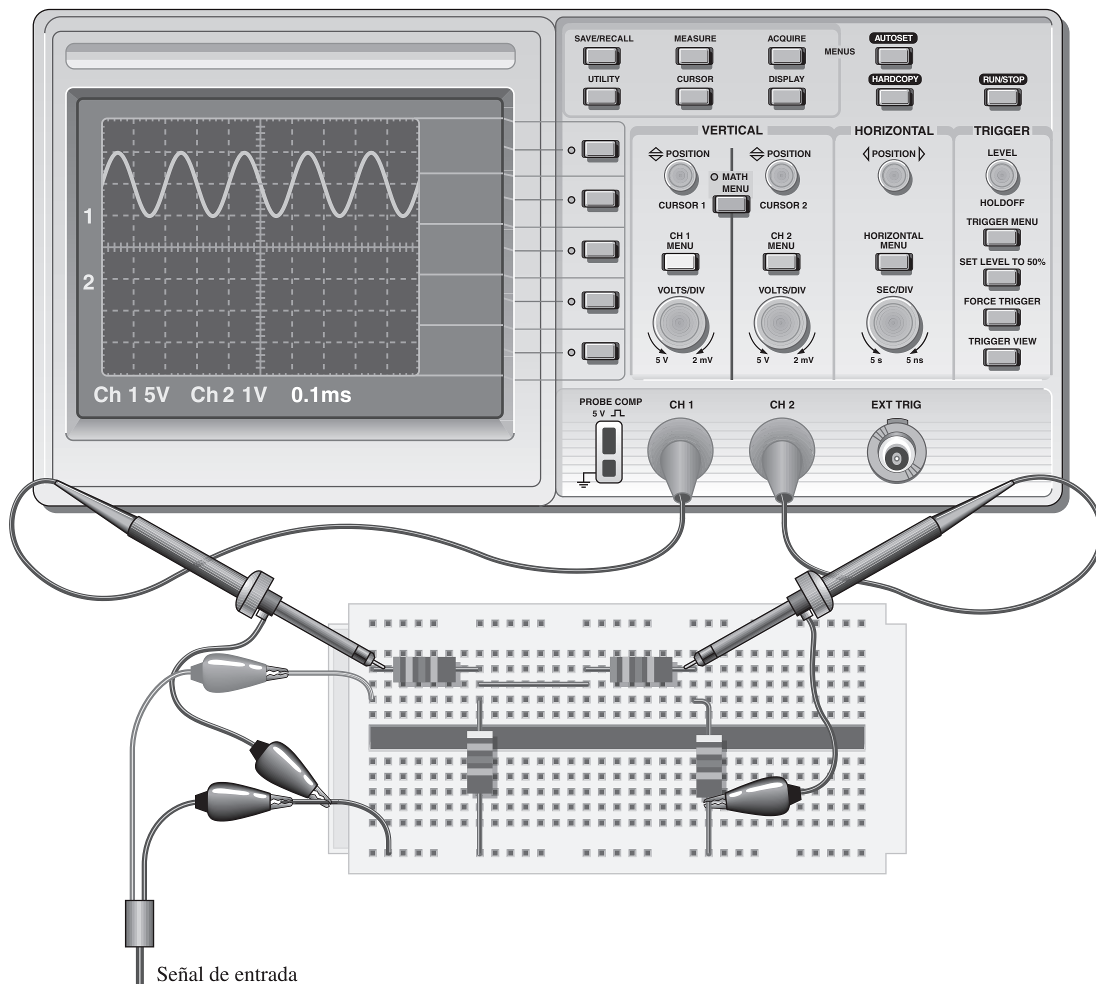
SECCIÓN 11–10 El osciloscopio

43. Determine el valor pico y el periodo para la onda seno mostrada en la pantalla del osciloscopio de la figura 11-89.

▶ FIGURA 11–89

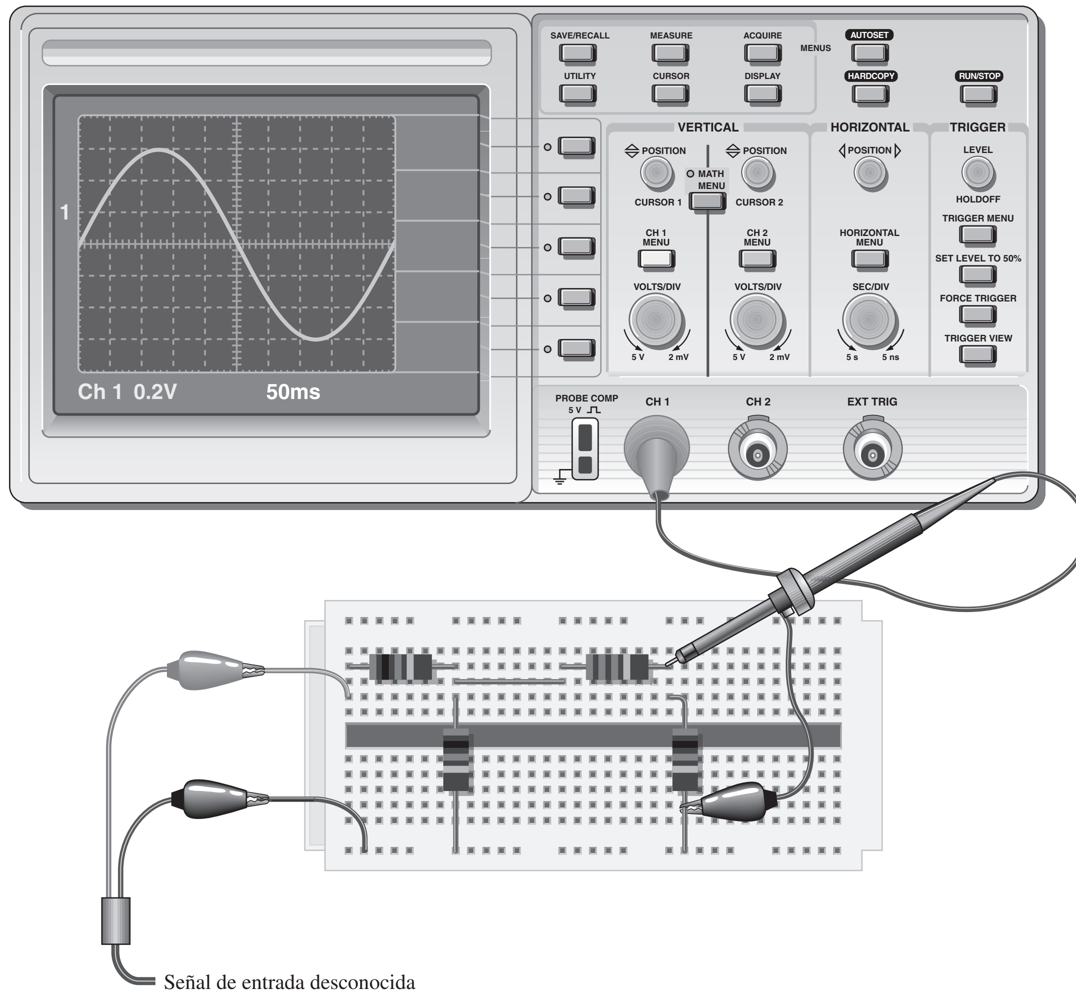


*** 44.** Con base en los ajustes del instrumento y en un examen de la pantalla del osciloscopio y de la tarjeta prototipo mostrados en la figura 11-90, determine la frecuencia y el valor pico de las señales de entrada y salida. La forma de onda mostrada es el canal 1. Trace la forma de onda del canal 2 como aparecería en el osciloscopio con los ajustes indicados.



▲ FIGURA 11–90

*45. Examine la tarjeta prototipo y la pantalla del osciloscopio mostrado en la figura 11-91 y determine el valor pico y la frecuencia de la señal de entrada desconocida.



▲ FIGURA 11–91



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

46. Abra el archivo P11-46 y mida los voltajes pico y rms entre cada uno de los resistores.

47. Abra el archivo P11-47 y mida los voltajes pico y rms entre cada uno de los resistores.

48. Abra el archivo P11-48. Determine si existe una falla, y si la hay, identifíquela.

49. Abra el archivo P11-49 y mida la corriente rms en cada rama del circuito.

50. Abra el archivo P11-50. Determine si hay una falla, y si la hay, identifíquela.

51. Abra el archivo P11-51 y mida el voltaje total entre el resistor con un osciloscopio.

52. Abra el archivo P11-52 y mida el voltaje total entre el resistor con un osciloscopio.

RESUMEN

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 11–1 La forma de onda sinusoidal

1. Un ciclo de una onda seno va del cruce por cero a través de un pico positivo, luego a través de cero hasta un pico negativo y de regreso al cruce por cero.

2. Una onda seno cambia de polaridad en los cruces por cero.
3. Una onda seno tiene dos puntos máximos (picos) por cada ciclo.
4. El periodo es desde un cruce por cero hasta el siguiente cruce por cero correspondiente, o desde un pico hasta el siguiente pico correspondiente.
5. Frecuencia es el número de ciclos completados en un segundo; la unidad de frecuencia es el hertz.
6. $f = 1/T = 200$ kHz
7. $T = 1/f = 8.33$ ms

SECCIÓN 11–2 Fuentes de voltaje sinusoidal

1. Por medio de métodos electromagnéticos y electrónicos se generan ondas seno.
2. La rapidez y la frecuencia son directamente proporcionales.
3. Un oscilador es un circuito electrónico que produce formas de onda repetitivas.

SECCIÓN 11–3 Valores sinusoidales de voltaje y corriente

1. **(a)** $V_{pp} = 2(1\text{ V}) = 2\text{ V}$ **(b)** $V_{pp} = 2(1.414)(1.414\text{ V}) = 4\text{ V}$
   (c) $V_{pp} = 2(1.57)(3\text{ V}) = 9.42\text{ V}$
2. **(a)** $V_{\text{rms}} = (0.707)(2.5\text{ V}) = 1.77\text{ V}$ **(b)** $V_{\text{rms}} = (0.5)(0.707)(10\text{ V}) = 3.54\text{ V}$
   (c) $V_{\text{rms}} = (0.707)(1.57)(1.5\text{ V}) = 1.66\text{ V}$
3. **(a)** $V_{\text{prom}} = (0.637)(10\text{ V}) = 6.37\text{ V}$ **(b)** $V_{\text{prom}} = (0.637)(1.414)(2.3\text{ V}) = 2.07\text{ V}$
   (c) $V_{\text{prom}} = (0.637)(0.5)(60\text{ V}) = 19.1\text{ V}$

SECCIÓN 11–4 Medición angular de una onda seno

1. **(a)** Pico positivo en 90° **(b)** Cruce por cero hacia negativo en 180°
   (c) Pico negativo en 270° **(d)** Final del ciclo en 360°
2. Medio ciclo: 180°; π
3. Ciclo completo: 360°; 2π
4. $90° - 45° = 45°$

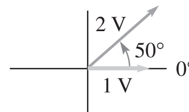
SECCIÓN 11–5 La fórmula de la onda seno

1. $v = (10\text{ V})\text{sen}(120°) = 8.66\text{ V}$
2. $v = (10\text{ V})\text{sen}(45° + 10°) = 8.19\text{ V}$
3. $v = (5\text{ V})\text{sen}(90° - 25°) = 4.53\text{ V}$

SECCIÓN 11–6 Introducción a los fasores

1. Representación gráfica de magnitud y posición angular de una cantidad que cambia con el tiempo.
2. 9425 rad/s
3. 100 Hz
4. Vea la figura 11-92.

▶ FIGURA 11–92



SECCIÓN 11–7 Análisis de circuitos de ca

1. $I_p = V_p/R = (1.57)(12.5\text{ V})/330\ \Omega = 59.5\text{ mA}$
2. $V_{s(\text{rms})} = (0.707)(25.3\text{ V}) = 17.9\text{ V}$

SECCIÓN 11–8 Voltajes superpuestos de cd y de ca

1. $+V_{máx} = 5\text{ V} + 2.5\text{ V} = 7.5\text{ V}$
2. Sí, alternará.
3. $+V_{máx} = 5\text{ V} - 2.5\text{ V} = 2.5\text{ V}$

SECCIÓN 11–9 Formas de onda no sinusoidales

1. **(a)** El tiempo de subida es el intervalo de tiempo desde el 10% hasta el 90% del borde de subida del pulso.
   (b) El tiempo de caída es el intervalo de tiempo desde el 90% hasta el 10% del borde de caída del pulso.
   (c) El ancho de pulso es el intervalo de tiempo desde el 50% del borde de entrada del pulso hasta el 50% del borde de salida del pulso.
2. $f = 1/1\text{ ms} = 1\text{ kHz}$
3. d.c. = (1/5)100% = 20%; Ampl. 1.5 V; $V_{\text{prom}} = 0.5\text{ V} + 0.2(1.5\text{ V}) = 0.8\text{ V}$
4. $T = 16\text{ ms}$
5. $f = 1/T = 1/1\ \mu\text{s} = 1\text{ MHz}$
6. La frecuencia fundamental es la velocidad de repetición de la forma de onda.
7. 2º armónico: 2 kHz.
8. $f = 1/10\ \mu\text{s} = 100\text{ kHz}$

SECCIÓN 11–10 El osciloscopio

1. Analógico: La señal controla la pantalla directamente.
   Digital: La señal se convierte en digital para su procesamiento y luego reconstruirla en la pantalla.
2. El voltaje se mide verticalmente; el tiempo se mide horizontalmente.
3. El control Volts/Div ajusta la escala de voltaje.
4. El control Sec/Div ajusta la escala de tiempo.
5. Siempre, a menos que se esté tratando de medir una señal de baja frecuencia muy baja.

Una aplicación de circuito

1. RF es radio frecuencia.
2. IF es frecuencia intermedia.
3. La frecuencia portadora es más alta que la de audio.
4. La amplitud varía en una señal de AM.

POBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

11–1 2.4 s
11–2 1.5 ms
11–3 20 kHz
11–4 200 Hz
11–5 66.7 kHz
11–6 30 rps
11–7 $V_{pp} = 50\text{ V}$; $V_{\text{rms}} = 17.7\text{ V}$; $V_{\text{prom}} = 15.9\text{ V}$
11–8 **(a)** $\pi/12$ rad **(b)** 112.5°
11–9 8°
11–10 18.1 V
11–11 10.6 V
11–12 5 V en −85°
11–13 34.2 V
11–14 $I_{\text{rms}} = 4.53\text{ mA}$; $V_{1(\text{rms})} = 4.53\text{ V}$; $V_{2(\text{rms})} = 2.54\text{ V}$; $P_{tot} = 32.0\text{ mW}$
11–15 23.7 V
11–16 La forma de onda en la parte (a) nunca llega a ser negativa. En la parte (b) llega a ser negativa en una fracción de su ciclo.
11–17 5%
11–18 1.2 V
11–19 120 V

11–20 Parte (a) 1.06 V, 50 Hz.
Parte (b) 88.4 mV, 1.67 kHz.
Parte (c) 4.81 V, 5 kHz.
Parte (d) 7.07 V, 2.50 kHz.

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (b) **3.** (c) **4.** (b) **5.** (d) **6.** (a) **7.** (a) **8.** (a)
9. (c) **10.** (b) **11.** (a) **12.** (b) **13.** (d) **14.** (c) **15.** (b) **16.** (d)

EXAMEN RÁPIDO

1. (a) **2.** (a) **3.** (b) **4.** (b) **5.** (c) **6.** (b)
7. (a) **8.** (a) **9.** (a) **10.** (a) **11.** (b) **12.** (a)

12 CAPACITORES

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Describir la construcción y las características básicas de un capacitor
- Estudiar los diversos tipos de capacitores
- Analizar capacitores en serie
- Analizar capacitores en paralelo
- Analizar circuitos de cd con capacitores conmutados
- Analizar circuitos de ca capacitivos
- Examinar algunas aplicaciones de los capacitores
- Estudiar la operación de circuitos conmutados por un capacitor

TÉRMINOS CLAVE

- Capacitor
- Constante de tiempo *RC*
- Dieléctrico
- Farad (F)
- Ley de Coulomb
- Potencia instantánea
- Potencia reactiva
- Potencia real (activa o verdadera)
- Reactancia capacitiva
- VAR (volt-ampere reactivo)
- Voltaje de oscilación (o de rizo)

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito se verá cómo utilizar un capacitor para acoplar voltajes de señales hacia y desde un amplificador. También se localizarán fallas en el amplificador por medio de formas de onda vistas en un osciloscopio.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En capítulos previos, el resistor fue el único componente pasivo estudiado. Los capacitores e inductores son otros tipos de componentes eléctricos pasivos básicos. En el capítulo 13 se estudiarán los inductores.

En este capítulo, usted aprenderá acerca del capacitor y sus características. Se analiza la construcción física, las propiedades eléctricas, y los efectos de conectar capacitores en serie y en paralelo. Cómo funciona un capacitor en circuitos de ca y de cd es una parte importante de esta sección, y constituye la base para el estudio de circuitos reactivos en función tanto de respuesta a la frecuencia como de respuesta al tiempo.

El *capacitor* es un dispositivo eléctrico que puede guardar carga eléctrica, con lo cual crea un campo eléctrico que, a su vez, guarda energía. La medida de la capacidad de almacenamiento de energía de un capacitor es su *capacitancia*. Cuando se aplica una señal sinusoidal a un capacitor, éste reacciona de cierta manera y produce oposición a la corriente, la cual depende de la frecuencia y la señal aplicada. Esta oposición a la corriente se llama *reactancia capacitiva*.

12–1 EL CAPACITOR BÁSICO

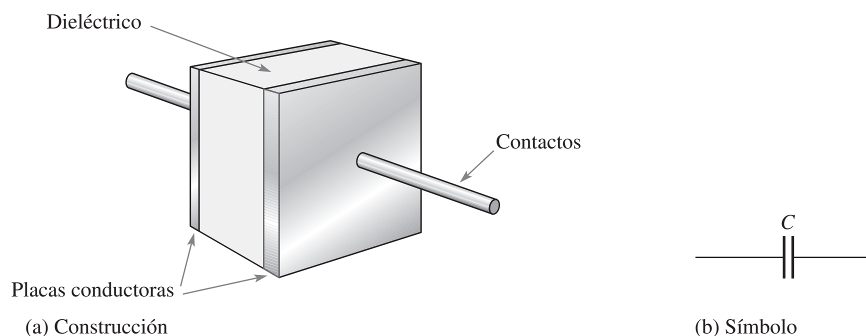
Un **capacitor** es un componente eléctrico pasivo que guarda energía eléctrica y tiene la propiedad de capacitancia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir la construcción básica y las características de un capacitor**
  - Explicar cómo guarda energía un capacitor
  - Definir el término *capacitancia* y formular su unidad
  - Expresar la ley de Coulomb
  - Explicar cómo guarda energía un capacitor
  - Analizar el voltaje nominal y el coeficiente de temperatura
  - Explicar la dispersión capacitiva
  - Explicar cómo afectan las características físicas a la capacitancia

Construcción básica

En su más simple forma, un capacitor es un dispositivo eléctrico que guarda energía eléctrica y se construye con dos placas conductoras paralelas separadas por un material aislante llamado **dieléctrico**. Los conectores están unidos a las placas paralelas. En la figura 12-1(a) se muestra un capacitor básico, y la parte (b) ilustra el símbolo esquemático.



▲ **FIGURA 12–1**

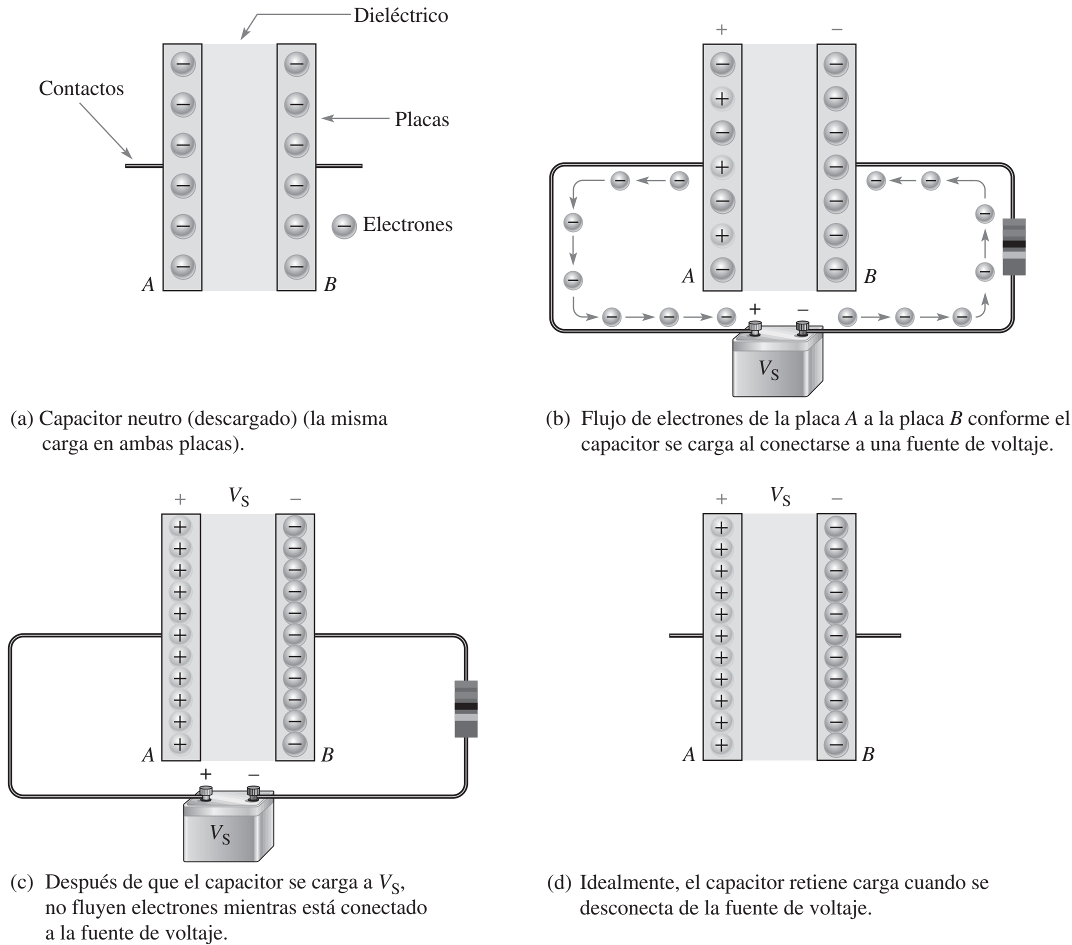
El capacitor básico.

NOTA DE SEGURIDAD

Los capacitores son capaces de guardar carga eléctrica durante mucho tiempo después de que se corta la corriente en un circuito. Tenga cuidado cuando toque o maneje capacitores dentro o fuera de un circuito. ¡Si toca los conductores, puede estar propenso a recibir un choque eléctrico conforme el capacitor se descarga a través de usted! En general, es buena práctica descargar un capacitor mediante un herramienta de puesta en cortocircuito con mango aislado de alguna clase antes de manejar el capacitor.

Cómo guarda carga un capacitor

En estado neutro, las dos placas de un capacitor tienen el mismo número de electrones libres, como se indica en la figura 12-2(a). Cuando el capacitor se conecta a una fuente de voltaje mediante una resistencia, según muestra la parte (b), se liberan electrones (carga negativa) de la placa *A*, los cuales se depositan en la placa *B* en un número igual que el liberado. A medida que la placa *A* pierde electrones y la placa *B* los gana, la placa *A* se vuelve positiva con respecto a la placa *B*. Durante este proceso de carga, los electrones fluyen sólo a través de los contactos. Por el dieléctrico del capacitor no fluyen electrones porque es un aislante. El movimiento de electrones cesa cuando el voltaje presente en el capacitor es igual al voltaje de fuente, como se indica en la figura 12-2(c). Si el capacitor se desconecta de la fuente, retiene la carga almacenada durante un largo periodo (el cual depende del tipo de capacitor) y aún tiene voltaje de un lado a otro de él, como ilustra la figura 12-2(d). Un capacitor cargado es capaz de actuar como batería temporal.



(a) Capacitor neutro (descargado) (la misma carga en ambas placas).

(b) Flujo de electrones de la placa *A* a la placa *B* conforme el capacitor se carga al conectarse a una fuente de voltaje.

(c) Después de que el capacitor se carga a V_S, no fluyen electrones mientras está conectado a la fuente de voltaje.

(d) Idealmente, el capacitor retiene carga cuando se desconecta de la fuente de voltaje.

▲ **FIGURA 12–2**

Ilustración de un capacitor que guarda carga.

Capacitancia

La cantidad de carga que un capacitor puede almacenar por unidad de voltaje entre sus placas es su capacitancia, designada mediante *C*. Es decir, la **capacitancia** es una medida de la capacidad de un capacitor de guardar carga. Mientras más carga por unidad de voltaje puede guardar un capacitor, más grande es su capacidad, como lo expresa la fórmula siguiente:

Ecuación 12–1
$$C = \frac{Q}{V}$$

donde *C* es capacitancia, *Q* es carga, y *V* es voltaje.

Al reordenar los términos en la ecuación 12-1, se obtienen dos fórmulas.

Ecuación 12–2
$$Q = CV$$

Ecuación 12–3
$$V = \frac{Q}{C}$$

La unidad de capacitancia El farad (F) es la unidad básica de capacitancia. Recuerde que el coulomb (C) es la unidad de carga eléctrica.

Un farad es la cantidad de capacitancia cuando se guarda un coulomb (C) de carga con un volt entre las placas.

La mayoría de los capacitores que se utilizan en trabajos de electrónica tienen valores de capacitancia especificados en microfarads (μF) y picofarads (pF). Un microfarad es un millonési-

mo de farad (1 μF = 1 $\times$ 10^{-6}F), y un picofarad es un trillonésimo de farad (1 pF = 1 $\times$ 10^{-12}F). En la tabla 12-1 se dan conversiones de farads, microfarads y picofarads.

◀ **TABLA 12–1**

PARA CONVERTIR DE	A	RECORRA EL PUNTO DECIMAL
Farads	Microfarads	6 lugares a la derecha ($\times 10^{6}$)
Farads	Picofarads	12 lugares a la derecha ($\times 10^{12}$)
Microfarads	Farads	6 lugares a la izquierda ($\times 10^{-6}$)
Microfarads	Picofarads	6 lugares a la derecha ($\times 10^{6}$)
Picofarads	Farads	12 lugares a la derecha ($\times 10^{-12}$)
Picofarads	Microfarads	6 a la izquierda ($\times 10^{-6}$)

EJEMPLO 12–1

(a) Cierto capacitor guarda 50 microcoulombs (50 μC) con 10 V entre sus placas. ¿Cuál es su capacitancia en unidades de microfarads?

(b) Un capacitor de 2.2 μF tiene 100 V entre sus placas. ¿Cuánta carga guarda?

(c) Determine el voltaje entre las placas de un capacitor de 1000 pF que guarda 20 microfarads (20 μC) de carga.

Solución

(a) $C = \frac{Q}{V} = \frac{50\ \mu\text{C}}{10\ \text{V}} = \mathbf{5\ \mu F}$

(b) $Q = CV = (2.2\ \mu\text{F})(100\ \text{V}) = \mathbf{220\ \mu C}$

(c) $V = \frac{Q}{C} = \frac{20\ \mu\text{C}}{1000\ \text{pF}} = \mathbf{20\ kV}$

*Problema relacionado** Determine V si C = 1000 pF y Q = 100 μC.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 12–2

Convierta los siguientes valores en microfarads:

(a) 0.00001 F **(b)** 0.0047 F **(c)** 1000 pF **(d)** 220 pF

Solución

(a) $0.00001\ \text{F} \times 10^{6}\ \mu\text{F/F} = \mathbf{10\ \mu F}$ **(b)** $0.0047\ \text{F} \times 10^{6}\ \mu\text{F/F} = \mathbf{4700\ \mu F}$

(c) $1000\ \text{pF} \times 10^{-6}\ \mu\text{F/pF} = \mathbf{0.001\ \mu F}$ **(d)** $220\ \text{pF} \times 10^{-6}\ \mu\text{F/pF} = \mathbf{0.00022\ \mu F}$

Problema relacionado Convierta 47,000 pF en microfarads.

EJEMPLO 12–3

Convierta los siguientes valores en picofarads:

(a) 0.1×10^{-8} F **(b)** 0.000022 F **(c)** 0.01 μF **(d)** 0.0047 μF

Solución

(a) $0.1 \times 10^{-8}\ \text{F} \times 10^{12}\ \text{pF/F} = \mathbf{1000\ pF}$

(b) $0.000022\ \text{F} \times 10^{12}\ \text{pF/F} = \mathbf{22 \times 10^{6}\ pF}$

(c) $0.01\ \mu\text{F} \times 10^{6}\ \text{pF}/\mu\text{F} = \mathbf{10{,}000\ pF}$

(d) $0.0047\ \mu\text{F} \times 10^{6}\ \text{pF}/\mu\text{F} = \mathbf{4700\ pF}$

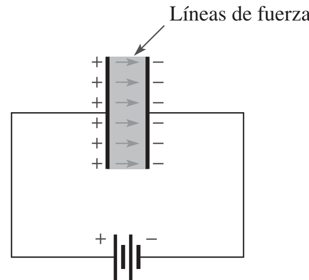
Problema relacionado Convierta 100 μF en picofarads.

Cómo guarda energía un capacitor

Un capacitor guarda energía en la forma de un campo eléctrico establecido por las cargas opuestas almacenadas en las placas. El campo eléctrico está representado por líneas de fuerza entre las cargas positiva y negativa y se concentra en el dieléctrico, como indica la figura 12-3.

▶ **FIGURA 12–3**

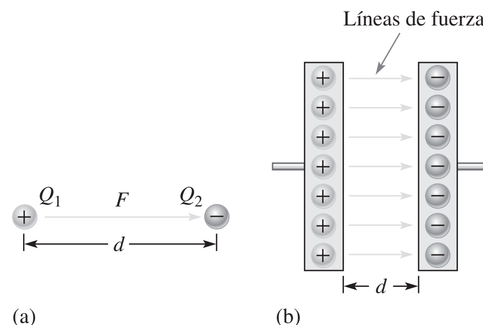
En un capacitor, el campo eléctrico guarda energía.



La **ley de Coulomb** expresa que

Existe una fuerza (*F*) entre dos cargas de fuente puntuales (Q_1, Q_2) que es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (*d*) entre las cargas.

La figura 12-4(a) ilustra una línea de fuerza entre una carga positiva y una carga negativa. La figura 12-4(b) muestra que muchas cargas opuestas distribuidas en las placas de un capacitor crean líneas de fuerza, las cuales forman un campo eléctrico que guarda energía en el dieléctrico. Aunque las cargas distribuidas ya no actúan como cargas de fuente puntuales y no obedecen con exactitud la ley de Coulomb, la fuerza sigue dependiendo de la cantidad de carga y de la distancia entre las placas.



▲ **FIGURA 12–4**

Las cargas opuestas crean líneas de fuerza.

Mientras más grandes son las fuerzas entre las cargas distribuidas en las placas de un capacitor, más energía se guarda. Así, la cantidad de energía guardada es directamente proporcional a la capacitancia porque mientras más carga se almacene, más grande es la fuerza.

Asimismo, con arreglo a la ecuación 12-2, la cantidad de carga guardada está directamente relacionada con el voltaje y con la capacitancia. Por consiguiente, la cantidad de energía almacenada también depende del cuadrado del voltaje presente entre las placas del capacitor. La fórmula para la energía guardada por un capacitor es

Ecuación 12–4

$$W = \frac{1}{2}CV^2$$

Cuando la capacitancia (*C*) está en farads y el voltaje (*V*) en volts, la energía (*W*) está en joules.

Voltaje nominal

Todo capacitor tiene un límite en la cantidad de voltaje que puede soportar entre sus placas. El voltaje nominal especifica el voltaje de cd máximo que puede ser aplicado sin riesgo de dañar el dispositivo. Si se excede este voltaje máximo, comúnmente llamado *voltaje de ruptura* o *voltaje de trabajo*, el capacitor puede dañarse permanentemente.

En una aplicación de circuito, se debe considerar tanto la capacitancia como el voltaje nominal antes de utilizar un capacitor. La selección de un valor de capacitancia se basa en requerimientos de circuito particulares. El voltaje nominal siempre deberá ser más alto que el voltaje máximo esperado en una aplicación en particular.

Resistencia dieléctrica La **resistencia dieléctrica** del material dieléctrico utilizado determina el voltaje de ruptura de un capacitor. La resistencia dieléctrica se expresa en V/mil (1 mil = 0.001 pulg = 2.54×10^{-5} m). La tabla 12-2 incluye valores típicos para varios materiales. Los valores exactos varían según la composición específica del material.

MATERIAL	RESISTENCIA DIELÉCTRICA (V/MIL)
Aire	80
Aceite	375
Cerámica	1000
Papel (parafinado)	1200
Teflón®	1500
Mica	1500
Vidrio	2000

◀ **TABLA 12–2**

Algunos materiales comunes dieléctricos y sus resistencias dieléctricas.

La resistencia dieléctrica de un capacitor se explica mejor con un ejemplo. Suponga que cierto capacitor tiene una separación entre sus placas de 1 mil y que el material dieléctrico es cerámica. Este capacitor en particular es capaz de soportar un voltaje máximo de 1000 V porque su resistencia dieléctrica es de 1000 V/mil. Si se excede el voltaje máximo, el dieléctrico puede romperse y conducir corriente, lo cual dañará el capacitor. Asimismo, si el capacitor de cerámica tiene una separación entre sus placas de 2 mils, su voltaje de ruptura es de 2000 V.

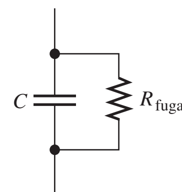
Coeficiente de temperatura

El **coeficiente de temperatura** indica la cantidad y dirección de un cambio de valor de capacitancia debido a la temperatura. Un coeficiente de temperatura positivo significa que la capacitancia se incrementa con una elevación de la temperatura o disminuye con un descenso de ésta. Un coeficiente negativo significa que la capacitancia disminuye con una elevación de la temperatura o se incrementa con un descenso de la temperatura.

Los coeficientes de temperatura se especifican generalmente en partes por millón por grados Celsius (ppm/°C). Por ejemplo, un coeficiente de temperatura negativo de 150 ppm/°C para un capacitor de 1 μF significa que, por cada elevación de un grado en la temperatura, la capacitancia disminuye en 150 pF (en un microfarad hay un millón de picofarads).

Fuga

Ningún material aislante es perfecto. El dieléctrico de cualquier capacitor conduce una muy pequeña cantidad de corriente. Por tanto, la carga en un capacitor finalmente se fugará. Algunos tipos de capacitores, tales como los grandes electrolíticos, sufren fugas más intensas que otros. En la figura 12-5 se muestra un circuito equivalente de un capacitor no ideal. El resistor en paralelo R_{fuga} representa la resistencia extremadamente alta (de varios cientos de ohms o más) del material dieléctrico a través del cual existe una corriente de fuga.



▲ **FIGURA 12–5**

Circuito equivalente a un capacitor no ideal.

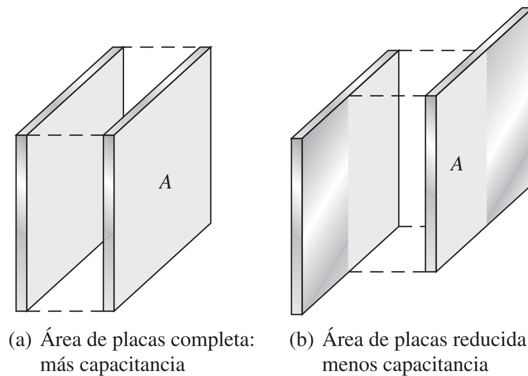
Características físicas de un capacitor

Los siguientes parámetros son importantes para establecer la capacitancia y el voltaje nominal de un capacitor, el área de placas, la separación de las placas, y la constante dieléctrica.

Área de placas *La capacitancia es directamente proporcional al tamaño físico de las placas como lo determina su área*. Un área de placas más grande produce más capacitancia, y un área pequeña produce menos capacitancia. La figura 12-6(a) muestra que el área de placa de un capacitor de placas paralelas es el área de una de las placas. Si una placa se desplaza en paralelo con respecto a la otra, como indica la figura 12-6(b), el área traslapada determina el área de placas efectiva. Esta variación del área de placas efectiva es la base de cierto tipo de capacitor variable.

▶ **FIGURA 12–6**

La capacitancia es directamente proporcional al área de placas (A).

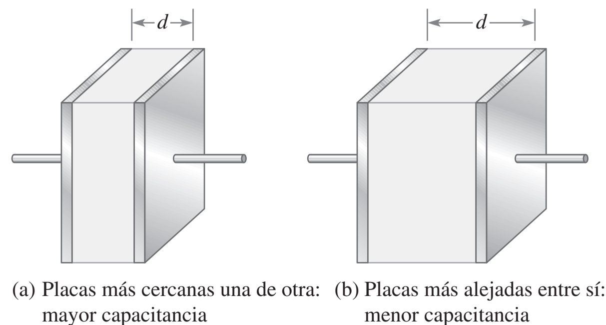


(a) Área de placas completa: más capacitancia (b) Área de placas reducida: menos capacitancia

Separación entre placas *La capacitancia es inversamente proporcional a la distancia que haya entre las placas*. La separación entre placas se designa mediante d, según muestra la figura 12-7. Una mayor separación de las placas produce una capacitancia más pequeña, como ilustra la figura. Como se vio previamente, el voltaje de ruptura es directamente proporcional a la separación de las placas. Mientras más separadas estén, más grande es el voltaje de ruptura.

▶ **FIGURA 12–7**

La capacitancia es inversamente proporcional a la distancia que hay entre las placas.



(a) Placas más cercanas una de otra: mayor capacitancia (b) Placas más alejadas entre sí: menor capacitancia

Constante dieléctrica Como se sabe, el material aislante localizado entre las placas de un capacitor se llama *dieléctrico*. Los materiales dieléctricos tienden a reducir el voltaje entre placas para una carga dada, y por tanto, incrementan la capacitancia. Si el voltaje es fijo, se puede guardar más carga por la presencia de un dieléctrico de la que se puede guardar sin un dieléctrico. La medida de la capacidad de un material para establecer un campo eléctrico se llama **constante dieléctrica** o *permitividad relativa*, y se simboliza mediante ε_r (ε es la letra griega epsilon).

La capacitancia es directamente proporcional a la constante dieléctrica. La constante dieléctrica del aire (vacío) se define como 1 y la del aire se aproxima mucho a 1. Estos valores se utilizan como referencia, y todos los demás materiales tienen valores de ε_r especificados con respecto

al valor del vacío o del aire. Por ejemplo, un material con $\varepsilon_r = 8$ puede producir una capacitancia ocho veces más grande que la del aire con todos los demás valores iguales.

La tabla 12-3 incluye varios materiales dieléctricos comunes y una constante dieléctrica típica para cada uno. Los valores pueden variar porque dependen de la composición específica del material.

▼ **TABLA 12–3**

Algunos materiales dieléctricos comunes y sus constantes dieléctricas.

MATERIAL	VALOR ε_r TÍPICO
Aire (vacío)	1.0
Teflón®	2.0
Papel (parafinado)	2.5
Aceite	4.0
Mica	5.0
Vidrio	7.5
Cerámica	1200

La constante dieléctrica (permitividad relativa) no tiene unidades porque es una medida relativa. Es una relación de la permitividad absoluta de un material, ε, a la permitividad absoluta del aire (vacío), ε_0, como lo expresa la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$ **Ecuación 12–5**

El valor de ε_0 es 8.85×10^{-12} F/m (farads por metro).

Fórmula Se ha visto que la capacitancia está relacionada directamente con el área de las placas, A, y la constante dieléctrica, ε_r, e inversamente relacionada con la separación de las placas, d. Una fórmula exacta para calcular la capacitancia en función de estas cantidades es

$$C = \frac{A\varepsilon_r(8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m})}{d}$$ **Ecuación 12–6**

donde A está en metros cuadrados (m^2), d en metros (m), y C en farads (F). Recuerde que la permitividad absoluta del aire (vacio), ε_0, es de 8.85×10^{-12} F/m, y que la permitividad de un dieléctrico (ε), derivada con la ecuación 12-5, es

$$\varepsilon = \varepsilon_r(8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m})$$

EJEMPLO 12–4 Determine la capacitancia de un capacitor de placas paralelas cuya área mide 0.01 m^2 y la separación entre placas es de 1 mil (2.54×10^{-5} m). El dieléctrico es mica, cuya constante dieléctrica es de 5.0.

Solución Use la ecuación 12-6.

$$C = \frac{A\varepsilon_r(8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m})}{d} = \frac{(0.01\ \text{m}^2)(5.0)(8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m})}{2.54 \times 10^{-5}\ \text{m}} = \mathbf{0.017\ \mu F}$$

Problema relacionado Determine C donde $A = 0.005\ \text{m}^2$, $d = 3$ mil (7.62×10^{-5} m), y el dieléctrico es cerámica.

REPASO DE LA SECCIÓN 12-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Definir el término *capacitancia*.
2. (a) ¿Cuántos microfarads hay en un farad?
   (b) ¿Cuántos picofarads hay en un farad?
   (c) ¿Cuántos picofarads hay en un microfarad?
3. Convierta 0.0015 μF en picofarads. En farads.
4. ¿Cuánta energía en joules guarda un capacitor de 0.01 mF con 15 V entre sus placas?
5. (a) Cuando el área de placas de un capacitor se incrementa, ¿la capacitancia aumenta o disminuye?
   (b) Cuando la distancia entre las placas se incrementa, ¿la capacitancia aumenta o disminuye?
6. La separación de las placas de un capacitor de cerámica es de 2 mils. ¿Cuál es el voltaje de ruptura típico?
7. El coeficiente de temperatura positivo de un capacitor de 2 μF a 25°C es de 50 ppm/°C. ¿Cuál es el valor de capacitancia cuando la temperatura se incrementa a 125°C?

12–2 TIPOS DE CAPACITORES

Los capacitores se clasifican normalmente de acuerdo con el tipo de material dieléctrico y si están o no polarizados. Los tipos más comunes de materiales dieléctricos son mica, cerámica, película plástica, y electrolíticos (óxido de aluminio y óxido de tantalio).

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

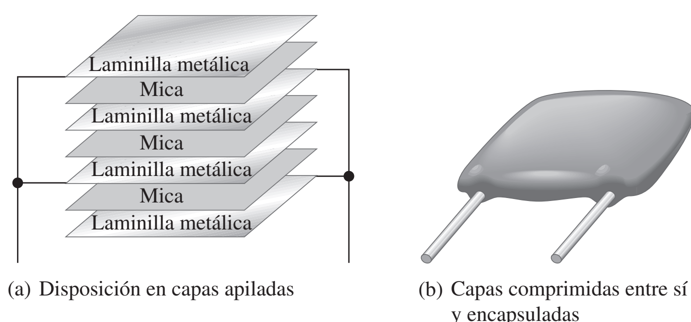
- **Analizar diversos tipos de capacitores**
  - Describir las características de los capacitores de mica, cerámica, película plástica, y electrolíticos
  - Describir tipos de capacitores variables
  - Identificar la rotulación de un capacitor
  - Analizar la medición de capacitancia

Capacitores fijos

Capacitores de mica Dos tipos de capacitores de mica son los de laminillas y hojas de mica plateada. La construcción básica del tipo apilado se muestra en la figura 12-8. Consta de capas

▶ **FIGURA 12–8**

Construcción de un capacitor de mica típico con conductor radial.



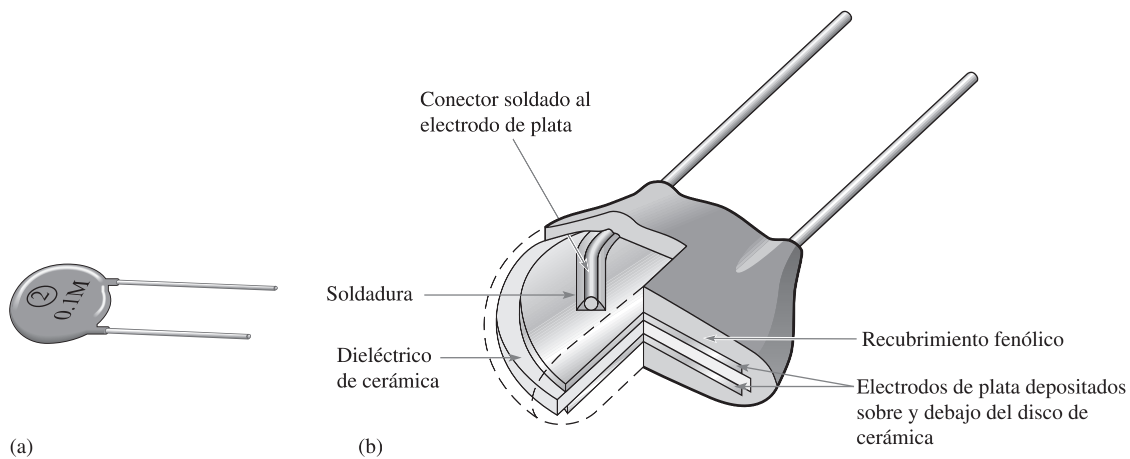
(a) Disposición en capas apiladas

(b) Capas comprimidas entre sí y encapsuladas

alternas de laminillas metálicas y delgadas hojas de mica. Las laminillas metálicas forman la placa, con las laminillas alternas conectadas entre sí para incrementar el área de placas. Se utilizan más capas para incrementar el área de placas, y por tanto, se incrementa la capacitancia. El apilamiento de hojas de mica/laminillas se encapsula en un material aislante, como Bakelite®, según muestra la figura 12-8(b). Un capacitor de mica plateada se forma de modo similar apilando hojas de mica con material de electrodo de plata depositado en ellas.

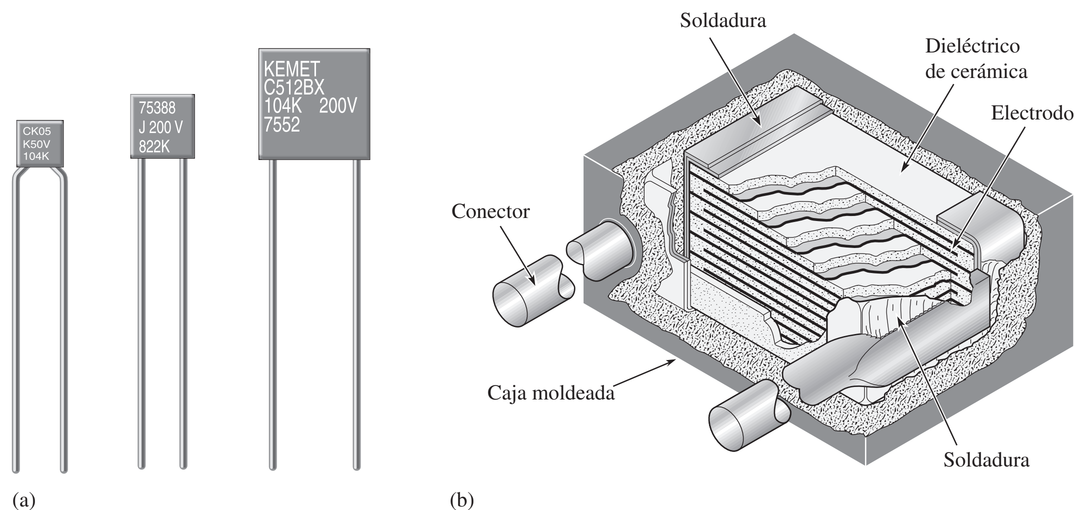
Los capacitores de mica están disponibles con valores de capacitancia que van desde 1 pF hasta 0.1 μF y voltajes nominales desde 100 V de cd hasta 2500 V de cd. Los coeficientes de temperatura comunes oscilan entre –20 ppm/°C hasta 100 ppm/°C. La mica tiene una constante dieléctrica típica de 5.

Capacitores de cerámica Los dieléctricos de cerámica proporcionan constantes dieléctricas muy altas (1200 es un valor típico). Por consiguiente, se pueden alcanzar valores de capacitancia comparativamente altos en un tamaño físico pequeño. Los capacitores de cerámica están disponibles comúnmente en forma de disco, como se muestra en la figura 12-9, en una configuración multicapas con conductor radial, figura 12-10, o en forma de “chip” de cerámica sin conductores, figura 12-11, para montaje en superficie sobre tarjetas de circuito impreso.



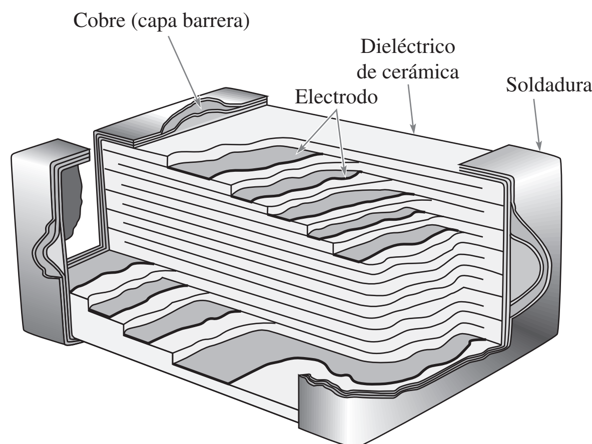
▲ **FIGURA 12–9**

Capacitor de disco de cerámica y su construcción básica.



▲ **FIGURA 12–10**

(a) Capacitores de cerámica típicos. (b) Vista de la construcción.



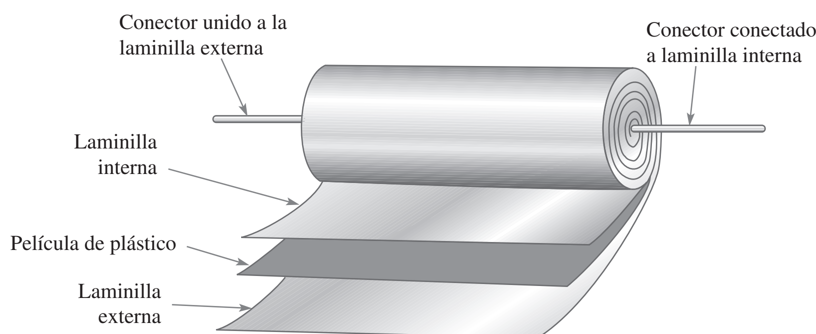
▲ **FIGURA 12–11**

Vista de la construcción de un capacitor de "chip" de cerámica típico utilizado para montaje superficial en tarjetas de circuito impreso.

Los capacitores de cerámica por lo general están disponibles con valores de capacitancia que van desde 1 pF hasta 2.2 μF con voltaje nominal de hasta 6 kV. Un coeficiente de temperatura típico para capacitores de cerámica es de 200,000 ppm/°C. Un tipo especial de cerámica en forma de disco tiene un coeficiente de temperatura de cero.

Capacitores de película plástica Los materiales dieléctricos comunes utilizados en capacitores de película plástica incluyen policarbonato, propileno, poliéster, poliestireno, polipropileno, y mylar. Algunos de estos tipos tienen valores de capacitancia de hasta 100 μF, pero la mayoría son de menos de 1 μF.

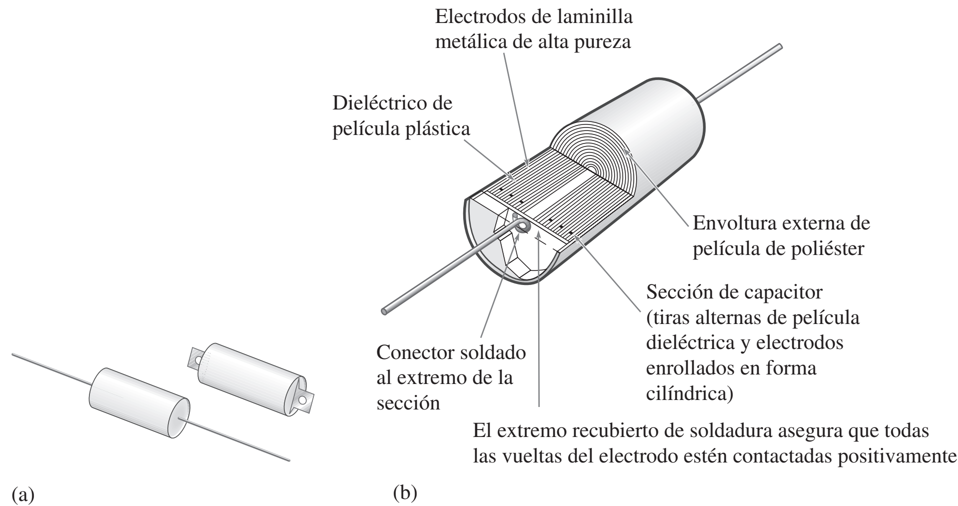
La figura 12-12 muestra una construcción básica común utilizada en muchos capacitores de película plástica. Una delgada tira de dieléctrico de película plástica se intercala entre dos delgadas tiras metálicas que actúan como placas. Un conductor se conecta a la placa interna y el otro a la externa como se indica. Las tiras se enrollan luego en una configuración espiral y encapsulan el empaque moldeado. Por tanto, un área de placas grande puede ser empaquetada en un tamaño físico relativamente pequeño, con lo cual se consiguen grandes valores de capacitancia. Otro método utiliza metal depositado directamente sobre la película dieléctrica para formar las placas.



▲ **FIGURA 12–12**

Construcción básica de capacitores tubulares con dieléctrico de película plástica y conector axial.

La figura 12-13(a) muestra capacitores de película plástica típicos. La figura 12-13(b) ilustra una vista de la construcción de un tipo de capacitor de película plástica.



▲ **FIGURA 12–13**

(a) Capacitores típicos. (b) Vista de la construcción de un capacitor de película plástica.

Capacitores electrolíticos Los capacitores electrolíticos se polarizan de modo que una placa sea positiva y la otra negativa. Estos capacitores se utilizan para valores de capacitancia que van desde 1 μF hasta más de 200,000 μF, pero sus voltajes de ruptura son relativamente bajos (350 V es un máximo característico) y sus cantidades de fuga son altas. En este texto, se considera que los capacitores con valores de 1 μF o más grandes están polarizados.

Los capacitores electrolíticos ofrecen valores de capacitancia mucho más altos que los de mica o cerámica, pero sus voltajes nominales son generalmente más bajos. Los electrolíticos de aluminio son, probablemente, el tipo más utilizado. En tanto que otros capacitores utilizan dos placas similares, el capacitor electrolítico consta de una placa de hoja de aluminio y de otra placa elaborada a partir de un electrolito conductor aplicado a determinado material, tal como película plástica. Estas dos “placas” están separadas por una capa de óxido de aluminio depositada sobre la superficie de la placa de aluminio. La figura 12-14(a) ilustra la construcción básica de un capacitor electrolítico de aluminio típico con conductores axiales. En la figura 12-14(b) se muestran otros capacitores electrolíticos con conductores radiales; la parte (c) ilustra el símbolo para un capacitor electrolítico.

La configuración de los electrolíticos de tantalio puede ser o tubular, parecida a la de la figura 12-14, o en forma de “gota”, como se muestra en la figura 12-15. En la configuración de gota, la placa positiva es en realidad un gránulo de polvo de tantalio en lugar de una laminilla. El pentóxido de tantalio forma el dieléctrico, y el bióxido de manganeso constituye la placa negativa.

Debido al proceso utilizado para fabricar el dieléctrico de óxido aislante, la placa metálica (de aluminio o tantalio) debe ser conectada de modo que siempre sea positiva con respecto a la placa de electrolito, y, por tanto, todos los capacitores electrolíticos se polarizan. La placa metálica (conductor positivo) generalmente se encuentra señalada con un signo más o con alguna otra marca evidente y siempre se conecta en un circuito de cd donde el voltaje a través del capacitor no cambia de polaridad pese a la presencia de cualquier corriente alterna. En general, el resultado de invertir la polaridad del voltaje es la destrucción completa del capacitor.

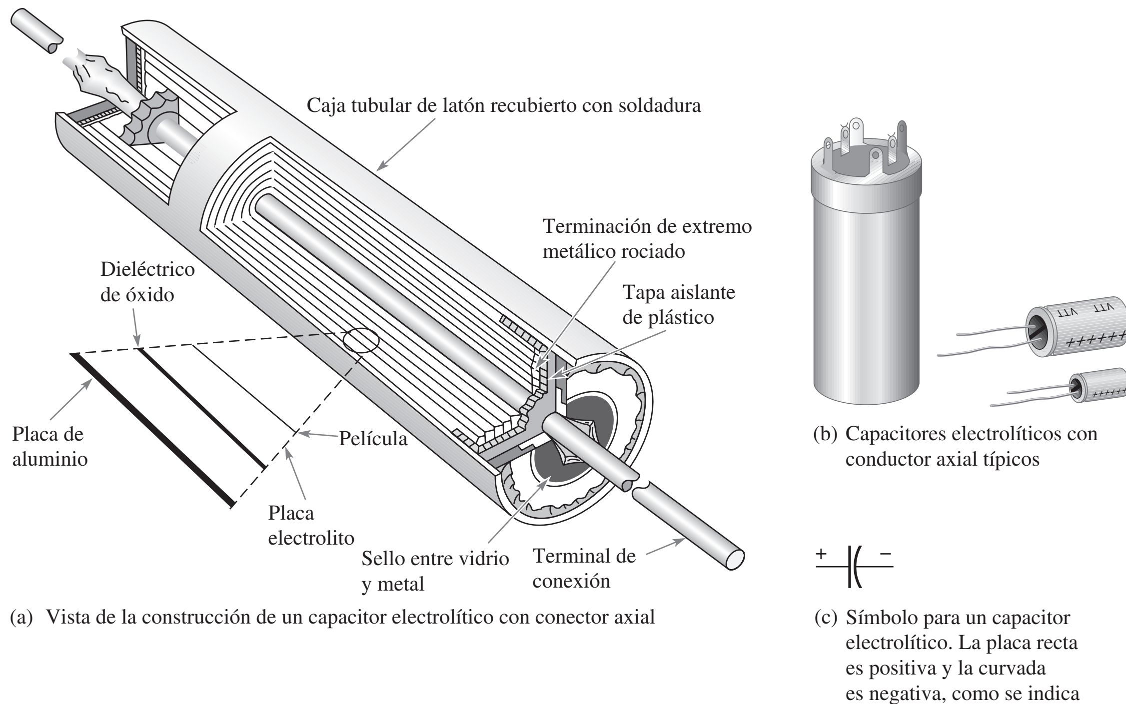
El problema de absorción dieléctrica ocurre en capacitores electrolíticos cuando no se descargan por completo durante su uso y conservan una carga residual. Aproximadamente el 25% de los capacitores defectuosos exhiben esta condición.

NOTA DE SEGURIDAD

Sea extremadamente cuidadoso con capacitores electrolíticos porque sí tiene que ver la forma en que se conecta un capacitor electrolítico. Siempre observe la polaridad apropiada. Si un capacitor polarizado se conecta a la inversa, puede explotar y provocar lesiones.

Capacitores variables

En un circuito se utilizan capacitores variables cuando existe la necesidad de ajustar el valor de capacitancia o manual o automáticamente. Estos capacitores, en general, son de menos de 300 pF,



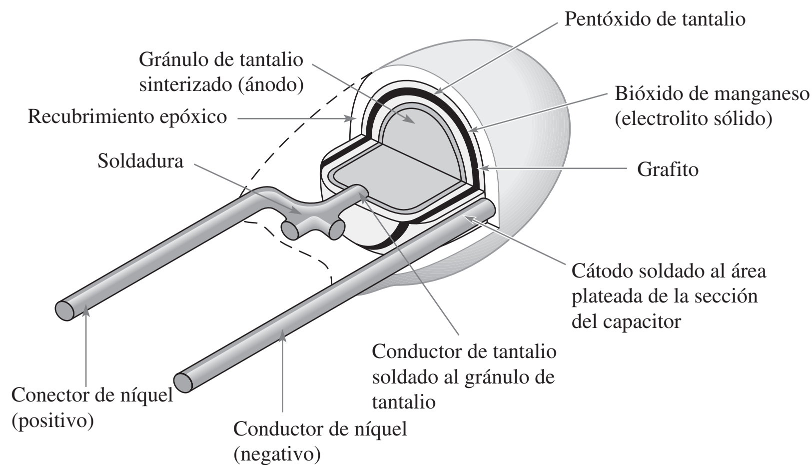
(a) Vista de la construcción de un capacitor electrolítico con conector axial

(b) Capacitores electrolíticos con conductor axial típicos

(c) Símbolo para un capacitor electrolítico. La placa recta es positiva y la curvada es negativa, como se indica

▲ **FIGURA 12–14**

Ejemplos de capacitores electrolíticos.



▲ **FIGURA 12–15**

Vista de la construcción de un capacitor electrolítico de tantalio en forma de "gota" típico.

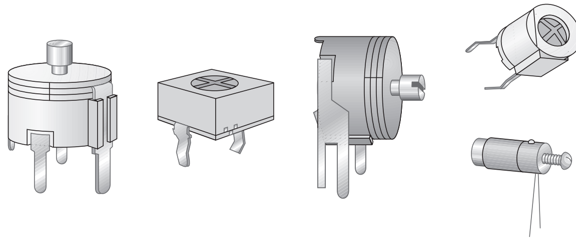


▲ **FIGURA 12–16**

Símbolo esquemático para un capacitor variable.

pero están disponibles con valores más grandes para aplicaciones especializadas. El símbolo esquemático para un capacitor variable se muestra en la figura 12-16.

Los capacitores ajustables que normalmente tienen ajustes tipo tornillo ranurado y se utilizan en un circuito para realizar ajustes muy finos se llaman **reguladores (trimmers)**. La cerámica o mica es un dieléctrico común en estos tipos de capacitores, y la capacitancia casi siempre se cambia ajustando la separación de las placas. En general, los capacitores reguladores tienen valores de menos de 100 pF. La figura 12-17 muestra algunos dispositivos típicos.



◀ **FIGURA 12–17**

Ejemplos de capacitores reguladores.

El **varactor** es un dispositivo semiconductor que exhibe una característica de capacitancia que puede ser variada al cambiar el voltaje entre sus terminales. Este dispositivo, por lo general, se estudia con detalle en un curso de dispositivos electrónicos.

Rotulación de capacitores

Los valores de capacitor se indican en el cuerpo del capacitor por medio de rotulación tipográfica o con códigos de colores. Los rótulos tipográficos constan de letras y números que indican diversos parámetros, tales como capacitancia, voltaje nominal y tolerancia.

Algunos capacitores no portan ninguna designación de unidad de capacitancia. En estos casos, las unidades están implícitas en el valor indicado y se reconocen gracias a la experiencia. Por ejemplo, un capacitor de cerámica marcado con .001 o .01 tiene unidades de microfarads porque valores en picofarads así de pequeños no están disponibles. Otro ejemplo: un capacitor de cerámica cuya designación sea de 50 o 330 tendrá unidades de picofarads porque unidades en microfarads así de grandes normalmente no están disponibles en este tipo de dispositivo. En algunos casos se utiliza designación de tres dígitos. Las primeras dos unidades son los primeros dos dígitos del valor de capacitancia. El tercer dígito es el número de ceros después del segundo dígito. Por ejemplo 103 significa, 10,000 pF. En algunos casos, las unidades se marcan como pF o μF; en ocasiones la unidad microfarad se rotula como MF o MFD.

Un voltaje nominal aparece en algunos tipos de capacitores con WV o WVDC y se omite en otros. Cuando se omite, el voltaje nominal se determina a partir de la información proporcionada por el fabricante. La tolerancia del capacitor, por lo general, se marca como un porcentaje, digamos $\pm 10\%$. El coeficiente de temperatura se indica como *partes por millón*. Este tipo de rótulo se compone de una P o una N seguidas por un número. Por ejemplo, N750 significa un coeficiente de temperatura negativo de 750 ppm/°C, y P30 significa un coeficiente de temperatura positivo de 30 ppm/°C. Una designación NP0 significa que los coeficientes positivo y negativo son de cero; por tanto, la capacitancia no cambia con la temperatura. Ciertos tipos de capacitores portan códigos de color. Consulte el apéndice C para enterarse acerca de designaciones adicionales de capacitor e información sobre códigos de color.

Medición de capacitancia

Se puede utilizar un medidor *LCR* como el mostrado en la figura 12-18 para verificar el valor de un capacitor. Asimismo, muchos multímetros digitales cuentan con la función de medición de capacitancia. La mayoría de los capacitores cambia de valor con el tiempo, algunos más que otros. Los capacitores de cerámica, por ejemplo, a menudo exhiben un cambio de valor del 10 al 15% durante el primer año. Los capacitores electrolíticos son particularmente propensos a cambiar de valor a causa del secado de la solución electrolítica. En otros casos, los capacitores pueden estar rotulados incorrectamente o se puede haber instalado el valor equivocado en el circuito. Aun cuando un cambio de valor representa menos del 25% de los capacitores defectuosos, una verificación del valor puede eliminar de inmediato este riesgo como causa del problema cuando se localizan fallas en un circuito.

Por lo general es posible medir valores desde 200 pF hasta 20 mF utilizando un medidor *LCR*, simplemente se conecta el capacitor, se ajusta el interruptor, y se lee el valor en la pantalla. Algunos medidores *LCR* también permiten revisar capacitores en busca de fugas de corriente. Para revisar en cuanto a fugas, se debe aplicar un voltaje suficiente entre las terminales del capacitor para simular condiciones de operación. Esto es realizado automáticamente por el instrumento de prueba. Casi el 40% de todos los capacitores defectuosos exhiben fugas de corriente excesivas, y los electrolíticos son particularmente susceptibles a este problema.



▲ **FIGURA 12–18**

Medidor *LCR* típico. (Cortesía de B+K Precision).

REPASO DE LA SECCIÓN 12-2

1. Nombre una forma de clasificar capacitores.
2. ¿Cuál es la diferencia entre un capacitor fijo y uno variable?
3. ¿Qué tipo de capacitor se polariza?
4. ¿Qué precauciones se deben tomar al instalar un capacitor polarizado en un circuito?

12–3 CAPACITORES EN SERIE

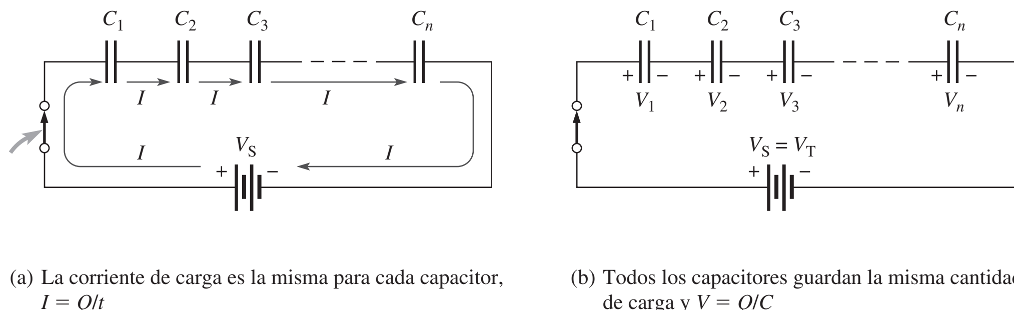
La capacitancia total de una conexión en serie de capacitores es menor que la capacitancia individual de cualquiera de los capacitores. Los capacitores dispuestos en serie dividen el voltaje que hay entre las terminales de cada uno ellos en proporción a su capacitancia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar capacitores en serie**
  - Determinar la capacitancia total
  - Determinar voltajes en capacitores

Capacitancia total

Cuando se conectan capacitores en serie, la capacitancia total es menor que el valor de la capacitancia más pequeña porque la separación efectiva entre las placas se incrementa. El cálculo de capacitancia total en serie es análogo al de resistencia total de resistores dispuestos en paralelo (Capítulo 6).



(a) La corriente de carga es la misma para cada capacitor, $I = Q/t$

(b) Todos los capacitores guardan la misma cantidad de carga y $V = Q/C$

▲ **FIGURA 12–19**

Circuito capacitivo dispuesto en serie.

Consideremos el circuito generalizado de la figura 12-19(a), el cual tiene n capacitores en serie con una fuente de voltaje y un interruptor. Cuando el interruptor se cierra, los capacitores se cargan a medida que se establece la corriente a través del circuito. Dado que tenemos un circuito en serie, la corriente debe ser la misma en todos los puntos, como se ilustra. Como la corriente es la velocidad de flujo de la carga, la cantidad de carga guardada por cada capacitor es igual a la carga total, expresada como

Ecuación 12–7

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n$$

A continuación, de acuerdo con la ley del voltaje de Kirchhoff, la suma de los voltajes entre las terminales de los capacitores cargados debe ser igual al voltaje total, V_T, según muestra la figura 12-19(b). Esto se expresa en forma de ecuación como

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$$

Según la ecuación 12-3, $V = Q/C$. Cuando esta relación se sustituye en cada término de la ecuación de voltaje, aparece el siguiente resultado:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3} + \cdots + \frac{Q_n}{C_n}$$

Como las cargas presentes en todos los capacitores son iguales, los términos Q se factorizan y cancelan, y el resultado es

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

Ecuación 12–8

Al tomar el recíproco de ambos miembros de la ecuación 12-8 se obtiene la siguiente fórmula general para la capacitancia total en serie:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}}$$

Ecuación 12–9

Recuerde,

La capacitancia total en serie siempre es menor que la capacitancia más pequeña.

Dos capacitores en serie Cuando sólo dos capacitores están en serie, se utiliza una forma especial de la ecuación 12-8.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1C_2}$$

Al tomar el recíproco de los términos izquierdo y derecho se obtiene la fórmula para la capacitancia total de dos capacitores en serie.

$$C_T = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}$$

Ecuación 12–10

Capacitores de igual valor dispuestos en serie Este caso especial es otro en el cual se puede desarrollar una fórmula a partir de la ecuación 12-8. Cuando todos los valores de capacitor son los mismos e iguales a C, la fórmula es

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \cdots + \frac{1}{C}$$

Al sumar todos los términos del lado derecho se obtiene

$$\frac{1}{C_T} = \frac{n}{C}$$

donde n es el número de capacitores de igual valor. Tomando el recíproco de ambos lados se obtiene

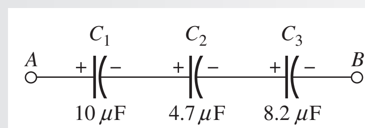
$$C_T = \frac{C}{n}$$

Ecuación 12–11

El valor de la capacitancia de capacitores iguales dividido entre el número de capacitores iguales dispuestos en serie proporciona la capacitancia total.

EJEMPLO 12–5 Determine la capacitancia total entre los puntos A y B de la figura 12-20.

▶ **FIGURA 12–20**



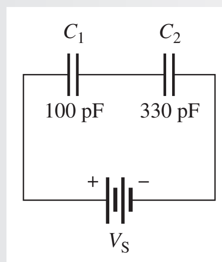
Solución Use la ecuación 12-9.

$$C_T = \frac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \dfrac{1}{C_3}} = \frac{1}{\dfrac{1}{10\ \mu F} + \dfrac{1}{4.7\ \mu F} + \dfrac{1}{8.2\ \mu F}} = \mathbf{2.30\ \mu F}$$

Problema relacionado Si se conecta un capacitor de 4.7 μF en serie con los tres capacitores existentes en la figura 12-20, ¿cuál es la C_T?

EJEMPLO 12–6 Determine la capacitancia total, C_T, en la figura 12-21.

▶ **FIGURA 12–21**



Solución Con la ecuación 12-10,

$$C_T = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} = \frac{(100\ pF)(330\ pF)}{430\ pF} = \mathbf{76.7\ pF}$$

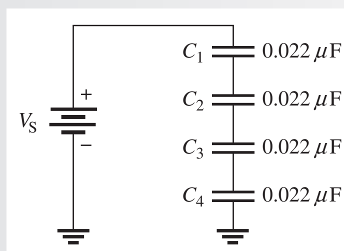
También se puede utilizar la ecuación 12-9.

$$C_T = \frac{1}{\dfrac{1}{100\ pF} + \dfrac{1}{330\ pF}} = \mathbf{76.7\ pF}$$

Problema relacionado Determine C_T si $C_1 = 470$ pF y $C_2 = 680$ pF en la figura 12-21.

EJEMPLO 12–7 Determine C_T para los capacitores dispuestos en serie de la figura 12-22.

▶ **FIGURA 12–22**



Solución Como $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$, use la ecuación 12-11,

$$C_T = \frac{C}{n} = \frac{0.022\ \mu F}{4} = \mathbf{0.0055\ \mu F}$$

Problema relacionado Determine C_T si los valores de capacitor de la figura 12-22 se duplican.

Voltajes en capacitores

Una conexión en serie de capacitores cargados actúa como divisor de voltaje. El voltaje entre las terminales de cada capacitor en serie es inversamente proporcional a su valor de capacitancia, como se demuestra mediante la fórmula $V = Q/C$. Es posible determinar el voltaje entre las terminales de cualquier capacitor individual en serie con la siguiente fórmula:

$$V_x = \left(\frac{C_T}{C_x}\right)V_T$$

Ecuación 12–12

donde C_x es cualquier capacitor en serie (tal como C_1, C_2 o C_3), V_x es el voltaje entre las terminales de C_x, y V_T es el voltaje total entre los capacitores. La derivación es como sigue: ya que la carga en cualquier capacitor en serie es la misma que la carga total ($Q_x = Q_T$), y como $Q_x = V_xC_x$ y $Q_T = V_TC_T$, entonces

$$V_xC_x = V_TC_T$$

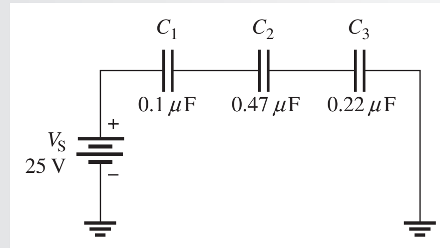
Al despejar V_x se obtiene

$$V_x = \frac{C_TV_T}{C_x}$$

En una conexión en serie, el capacitor de valor más grande tendrá el voltaje más pequeño entre sus terminales. El capacitor de valor más pequeño tendrá el voltaje más grande entre sus terminales.

EJEMPLO 12–8 Determine el voltaje entre cada capacitor en la figura 12-23.

▶ FIGURA 12–23



Solución Encuentre la capacitancia total.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{0.1\ \mu F} + \frac{1}{0.47\ \mu F} + \frac{1}{0.22\ \mu F}$$

$$C_T = 0.06\ \mu F$$

De acuerdo con la figura 12-24, $V_S = V_T = 25$ V. Por consiguiente, utilice la ecuación 12-12 para calcular el voltaje entre cada capacitor.

$$V_1 = \left(\frac{C_T}{C_1}\right)V_T = \left(\frac{0.06\ \mu F}{0.1\ \mu F}\right)25\ V = \mathbf{15.0\ V}$$

$$V_2 = \left(\frac{C_T}{C_2}\right)V_T = \left(\frac{0.06\ \mu F}{0.47\ \mu F}\right)25\ V = \mathbf{3.19\ V}$$

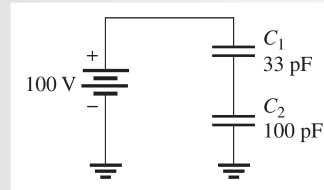
$$V_3 = \left(\frac{C_T}{C_3}\right)V_T = \left(\frac{0.06\ \mu F}{0.22\ \mu F}\right)25\ V = \mathbf{6.82\ V}$$

Problema relacionado Se conecta otro capacitor de 0.47 μF en serie con el capacitor existente en la figura 12-23. Determine el voltaje entre las terminales del nuevo capacitor, suponiendo que todos los capacitores están descargados inicialmente.

REPASO DE LA SECCIÓN 12-3

1. ¿Es la capacitancia de una conexión en serie menor o mayor que el valor del capacitor más pequeño?
2. Los siguientes capacitores están en serie: 100 pF, 220 pF y 560 pF. ¿Cuál es la capacitancia total?
3. Un capacitor de 0.01 μF y otro de 0.015 μF están en serie. Determine la capacitancia total.
4. Cinco capacitores de 100 pF están conectados en serie. ¿Cuál es la C_T?
5. Determine el voltaje entre las terminales de C_1 en la figura 12-24.

▶ FIGURA 12–24



12–4 CAPACITORES EN PARALELO

Las capacitancias se suman cuando los capacitores están conectados en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

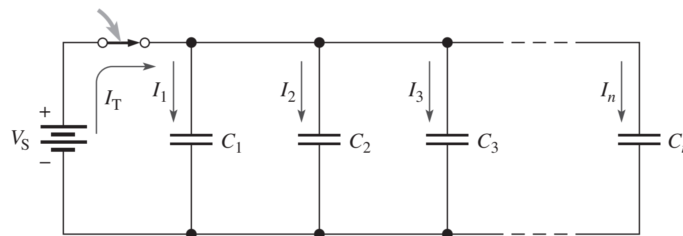
- **Analizar capacitores en paralelo**
  - Determinar la capacitancia total

Cuando se conectan capacitores en paralelo, la capacitancia total es la suma de las capacitancias individuales porque el área de las placas se incrementa. El cálculo de la capacitancia total en paralelo es análogo al de la resistencia total en serie (Capítulo 5).

Consideremos lo que sucede cuando se cierra el interruptor de la figura 12-25. La corriente de carga total que viene de la fuente se divide en la unión de las ramas en paralelo. Existe una corriente de carga diferente a través de cada rama, de modo que cada capacitor puede guardar distinta carga. Según la ley de la corriente de Kirchhoff, la suma de todas las corrientes de carga es igual a la corriente total. Por consiguiente, la suma de las cargas guardadas en los capacitores es igual a la carga total. Además, los voltajes entre todas las ramas en paralelo son iguales. Se utilizan estas observaciones para desarrollar, como vemos a continuación, una fórmula con qué calcular la capacitancia total en paralelo en el caso general de n capacitores dispuestos en paralelo.

Ecuación 12–13

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n$$



▲ FIGURA 12–25

Capacitores dispuestos en paralelo.

De acuerdo con la ecuación 12-2, $Q = CV$. Cuando se sustituye esta relación en cada término de la ecuación 12-13, se obtiene el siguiente resultado:

$$C_T V_T = C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_3 + \cdots + C_n V_n$$

Como $V_T = V_1 = V_2 = V_3 = \cdots = V_n$, los voltajes se factorizan y cancelan para obtener

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$$

Ecuación 12–14

La ecuación 12-14 es la fórmula general para determinar la capacitancia total en paralelo, donde n es el número de capacitores. Recuerde,

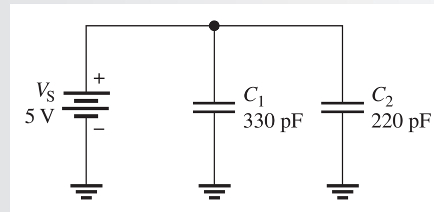
La capacitancia total en paralelo es la suma de todos los capacitores dispuestos en paralelo.

Para el caso especial en que todos los capacitores tienen el mismo valor, C, dicho valor se multiplica por el número (n) de capacitores en paralelo.

$$C_T = nC$$

Ecuación 12–15

EJEMPLO 12–9 ¿Cuál es la capacitancia total en la figura 12-26? ¿Cuál es el voltaje entre cada capacitor?



▲ FIGURA 12–26

Solución La capacitancia total es

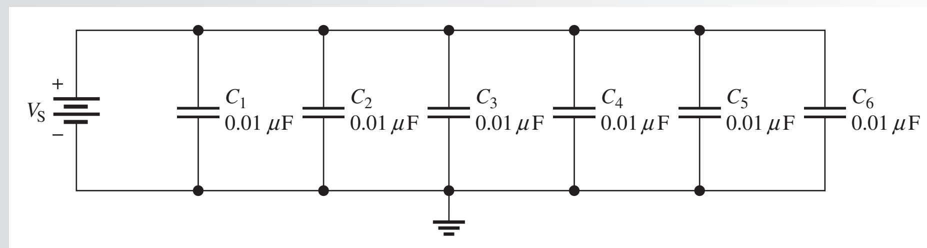
$$C_T = C_1 + C_2 = 330\,\text{pF} + 220\,\text{pF} = \mathbf{550\,pF}$$

El voltaje presente entre las terminales de cada capacitor dispuesto en paralelo es igual al voltaje de fuente.

$$V_S = V_1 = V_2 = \mathbf{5\,V}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la C_T si se conecta un capacitor de 100 pF en paralelo con C_2 en la figura 12-26?

EJEMPLO 12–10 Determine C_T en la figura 12-27.



▲ FIGURA 12–27

Solución Hay seis capacitores de igual valor en paralelo, por lo que $n = 6$.

$$C_T = nC = (6)(0.01\ \mu F) = \mathbf{0.06\ \mu F}$$

Problema relacionado Si se conectan tres capacitores más de 0.01 μF en paralelo en la figura 12-27, ¿cuál es la capacitancia total?

REPASO DE LA SECCIÓN 12-4

1. ¿Cómo se determina la capacitancia total en paralelo?
2. En cierta aplicación, se requieren 0.05 μF. Los únicos valores disponibles son de 0.01 μF, los cuales están disponibles en grandes cantidades. ¿Cómo se obtiene la capacitancia total requerida?
3. Los siguientes capacitores están en paralelo: 10 pF, 56 pF, 33 pF y 68 pF. ¿Cuál es la C_T?

12–5 CAPACITORES EN CIRCUITOS DE CD

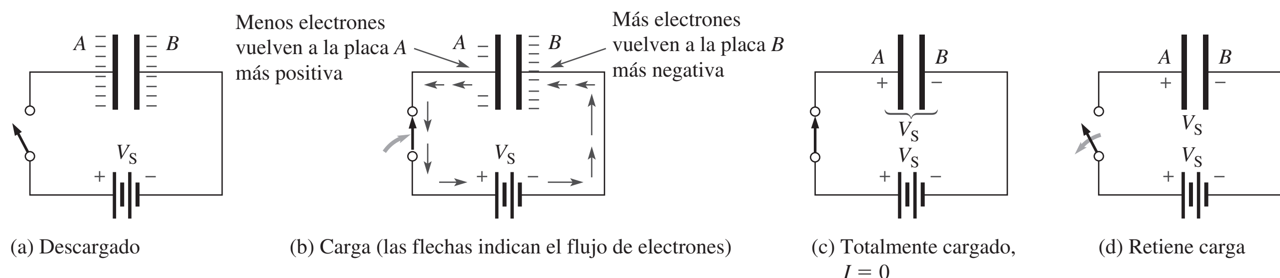
Un capacitor se carga cuando se conecta a una fuente de voltaje de cd. La acumulación de carga entre las placas ocurre de una manera predecible ya que depende de la capacitancia y la resistencia presentes en un circuito.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar circuitos capacitivos de cd conmutados**
  - Describir la carga y descarga de un capacitor
  - Definir el término *constante de tiempo RC*
  - Relacionar la constante de tiempo con la carga y descarga de un capacitor
  - Escribir ecuaciones para las curvas de carga y descarga
  - Explicar por qué un capacitor bloquea la corriente directa

Carga de un capacitor

Un capacitor se carga cuando se conecta a una fuente de voltaje de cd, como indica la figura 12-28. El capacitor de la parte (a) de la figura está descargado; es decir, la placa *A* y la placa *B* tienen igual cantidad de electrones libres. Cuando se cierra el interruptor, como ilustra la parte (b), la fuente mueve electrones desde la placa *A* a través del circuito hasta la placa *B* como lo indican las



▲ **FIGURA 12–28**

Carga de un capacitor.

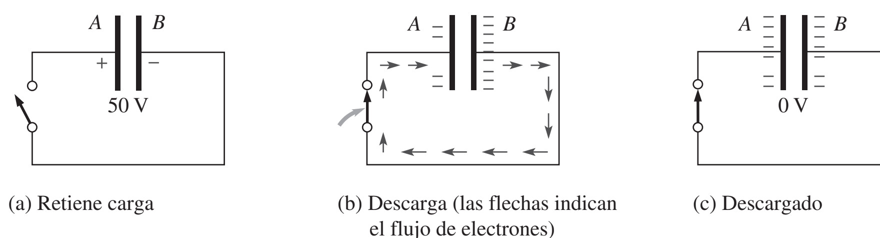
flechas. Conforme la placa *A* pierde electrones y la placa *B* los gana, la placa *A* se vuelve positiva con respecto a la placa *B*. A medida que este proceso de carga continúa, el voltaje entre las placas se acumula con rapidez hasta que es igual al voltaje aplicado, V_S, pero de polaridad opuesta, como se muestra en la parte (c). Cuando el capacitor está totalmente cargado, no hay corriente.

Un capacitor bloquea la corriente directa constante.

Cuando el capacitor cargado se desconecta de la fuente, según muestra la figura 12-28(d), permanece cargado durante largos lapsos de tiempo, de acuerdo con su resistencia a las fugas, y puede provocar choques eléctricos severos. En un capacitor electrolítico, generalmente la carga se fuga más rápido que en otros tipos de capacitor.

Descarga de un capacitor

Cuando se conecta un conductor eléctrico entre las terminales de un capacitor cargado, como se muestra en la figura 12-29, el capacitor se descargará. En este caso particular, se conecta una trayectoria de resistencia muy baja (el conductor eléctrico) entre las terminales del capacitor con un interruptor. Antes de que se cierre el interruptor, el capacitor se carga a 50 V, como indica la parte (a). Cuando se cierra el interruptor, según muestra la parte (b), el exceso de electrones en la placa *B* se desplaza a través del circuito hacia la placa *A* (indicado por las flechas); a consecuencia del movimiento de electrones por la baja resistencia del conductor eléctrico, la energía almacenada por el capacitor se disipa en el conductor eléctrico. La carga se neutraliza cuando la cantidad de electrones libres de nuevo es igual en ambas placas. En ese momento, el voltaje entre las terminales del capacitor es de cero y el capacitor se descarga por completo, como se muestra en la parte (c).



(a) Retiene carga (b) Descarga (las flechas indican el flujo de electrones) (c) Descargado

◀ **FIGURA 12–29**

Descarga de un capacitor cargado.

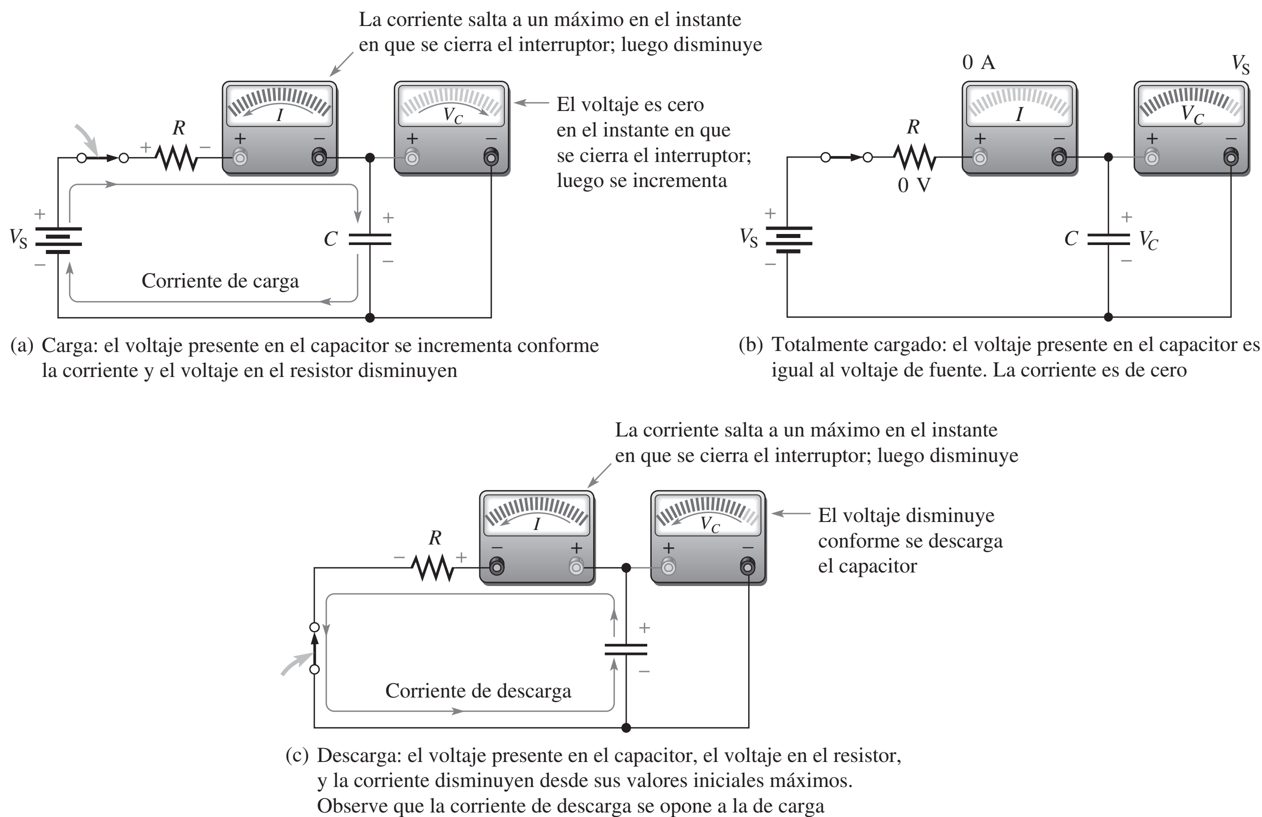
Corriente y voltaje durante la carga y descarga

En las figuras 12-28 y 12-29, advierta que la dirección del flujo de electrones durante la descarga se opone a la dirección presente durante la carga. Es importante entender que, idealmente, *no hay corriente a través del dieléctrico del capacitor durante la carga o descarga porque el dieléctrico es un material aislante.* Hay corriente de una placa a la otra sólo a través del circuito externo.

La figura 12-30(a) muestra un capacitor conectado en serie con un resistor y un interruptor a una fuente de voltaje de cd. Inicialmente, el interruptor está abierto y el capacitor está descargado con cero volts entre sus placas. En el instante en que se cierra el interruptor, la corriente salta a su valor máximo y el capacitor comienza a cargarse. La corriente es máxima inicialmente porque el capacitor tiene cero volts entre sus terminales y, por consiguiente, actúa efectivamente como un cortocircuito; por tanto, la corriente queda limitada sólo por la resistencia. Conforme pasa el tiempo y el capacitor se carga, la corriente disminuye y el voltaje entre las terminales del capacitor (V_C) se incrementa. En el resistor el voltaje es proporcional a la corriente durante este periodo de carga.

Después de cierto intervalo de tiempo, el capacitor se carga por completo. En ese momento la corriente es de cero y el voltaje en el capacitor es igual a la fuente de voltaje de cd, como se muestra en la figura 12-30(b). Si el interruptor se abriera ahora, el capacitor retendría su carga completa (omitiendo cualquier fuga).

En la figura 12-30(c), la fuente de voltaje se quitó. Cuando el interruptor se cierra, el capacitor comienza a descargarse. Al principio la corriente salta a un máximo, pero en dirección opuesta a



(a) Carga: el voltaje presente en el capacitor se incrementa conforme la corriente y el voltaje en el resistor disminuyen

(b) Totalmente cargado: el voltaje presente en el capacitor es igual al voltaje de fuente. La corriente es de cero

(c) Descarga: el voltaje presente en el capacitor, el voltaje en el resistor, y la corriente disminuyen desde sus valores iniciales máximos. Observe que la corriente de descarga se opone a la de carga

▲ **FIGURA 12–30**

Corriente y voltaje en un capacitor de carga y descarga.

la que tenía durante el proceso de carga. Conforme pasa el tiempo, la corriente y el voltaje disminuyen en el capacitor. En el resistor el voltaje siempre es proporcional a la corriente. Cuando el capacitor se descarga por completo, la corriente y el voltaje en el capacitor son cero.

Recuerde las siguientes reglas sobre capacitores en circuitos de cd:

1. Un capacitor aparece como una *abertura* ante un voltaje constante.
2. Un capacitor aparece como un *corto* ante un cambio instantáneo de voltaje.

A continuación, examinaremos con todo detalle cómo cambian con el tiempo el voltaje y la corriente en un circuito capacitivo.

La constante de tiempo *RC*

En una situación práctica, no puede haber capacitancia sin algo de resistencia en un circuito. Puede ser simplemente la pequeña resistencia de un conductor eléctrico, una resistencia de fuente Thevenin, o un resistor físico. Debido a esto, las características de carga y descarga de un capacitor siempre deben ser consideradas junto con la resistencia asociada. La resistencia introduce el elemento de *tiempo* en la carga y descarga de un capacitor.

Cuando un capacitor se carga o descarga a través de una resistencia, se requiere cierto tiempo para que se cargue o descargue por completo. El voltaje presente entre las terminales del capacitor no puede cambiar de manera instantánea porque se requiere un tiempo finito para mover la carga de un punto a otro. La constante de tiempo de un circuito *RC* en serie determina la velocidad a la cual el capacitor se carga o descarga.

La constante de tiempo *RC* es un intervalo fijo que es igual al producto de la resistencia por la capacitancia presentes en un circuito *RC* en serie.

La constante de tiempo se expresa en segundos cuando la resistencia está en ohms y la capacitancia en farads. Está simbolizada por τ y la fórmula es

$$\tau = RC$$ **Ecuación 12–16**

Recuerde que $I = Q/t$. La corriente depende de la cantidad de carga movida en un tiempo dado. Cuando se incrementa la resistencia, la corriente de carga se reduce, y por tanto, el tiempo de carga del capacitor aumenta. Cuando se incrementa la capacitancia, la cantidad de carga aumenta; por tanto, para la misma cantidad de corriente, se requiere más tiempo para cargar el capacitor.

EJEMPLO 12–11 Un circuito RC en serie tiene resistencia de 1.0 MΩ y capacitancia de 4.7 μF. ¿Cuál es la constante de tiempo?

Solución

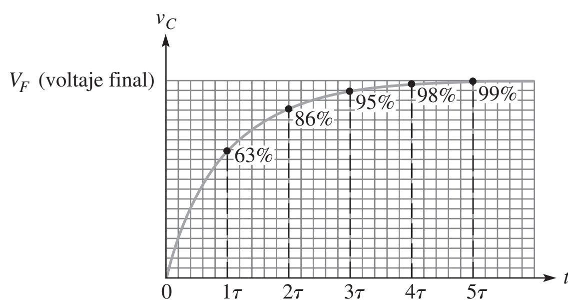
$$\tau = RC = (1.0 \times 10^6\ \Omega)(4.7 \times 10^{-6}\ \text{F}) = \mathbf{4.7\ s}$$

Problema relacionado Un circuito RC en serie tiene un resistor de 270 kΩ y un capacitor de 3300 pF. ¿Cuál es la constante de tiempo?

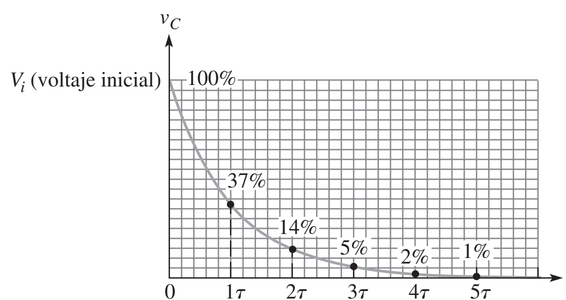
Cuando un capacitor se carga o descarga entre dos niveles de voltaje, la carga en el capacitor cambia en aproximadamente un 63% de la diferencia que haya en los niveles en una constante de tiempo. Un capacitor descargado se carga al 63% de su voltaje totalmente cargado en una constante de tiempo. Cuando un capacitor se descarga, su voltaje cae a aproximadamente un 100% − 63% = 37% de su valor inicial en una constante de tiempo, lo cual es un cambio del 63 por ciento.

Curvas de carga y descarga

Un capacitor se carga y descarga siguiendo una curva no lineal, como ilustra la figura 12-31. En estas gráficas, el porcentaje aproximado de carga completa se muestra en cada intervalo de constante de tiempo. Este tipo de curva sigue una fórmula matemática precisa llamada *curva exponencial*. La curva de carga es una exponencial creciente, y la curva de descarga es una exponencial menguante. Se requieren cinco constantes de tiempo para cambiar el voltaje en un 99% (considerado el 100%). El intervalo de cinco constantes de tiempo se acepta generalmente como el tiempo para cargar o descargar por completo un capacitor, y se llama *tiempo transitorio*.



(a) Curva de carga con porcentajes del voltaje final



(b) Curva de descarga con porcentajes del voltaje inicial

▲ **FIGURA 12–31**

Curvas de voltaje exponenciales correspondientes a la carga y descarga de un circuito *RC*.

Fórmula general Las expresiones generales para curvas exponenciales crecientes o menguantes se dan en las siguientes ecuaciones tanto para voltaje como para corriente instantáneos.

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau}$$ **Ecuación 12–17**

$$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-t/\tau}$$ **Ecuación 12–18**

donde V_F e I_F son los valores finales de voltaje y corriente, y V_i e I_i son los valores iniciales de voltaje y corriente. Las letras cursivas minúsculas v e i son los valores instantáneos de voltaje y corriente en el capacitor en el tiempo t, y e es la base de los logaritmos naturales. En la calculadora, la tecla e^x facilita el trabajo con este término exponencial.

Carga desde cero La fórmula para el caso especial en que una curva de voltaje exponencial creciente comienza en cero ($V_i = 0$), como se muestra en la figura 12-31(a), se proporciona en la ecuación 12-19. Se desarrolla como sigue, comenzando con la fórmula general, ecuación 12-17.

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} = V_F + (0 - V_F)e^{-t/RC} = V_F - V_F e^{-t/RC}$$

Al factorizar V_F, se obtiene

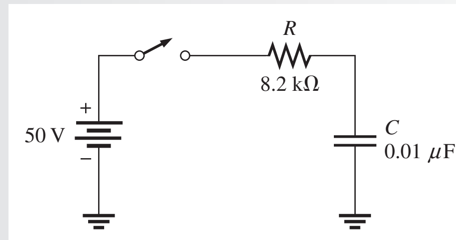
Ecuación 12–19

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC})$$

Con la ecuación 12-19, se calcula el valor del voltaje de carga de un capacitor en cualquier instante si inicialmente está descargado. Se puede calcular una corriente creciente sustituyendo v por i y V_F por I_F en la ecuación 12-19.

EJEMPLO 12–12 En la figura 12-32, determine el voltaje en el capacitor 50 μs después de que se cierra el interruptor si el capacitor inicialmente está descargado. Trace la curva de carga.

▶ **FIGURA 12–32**

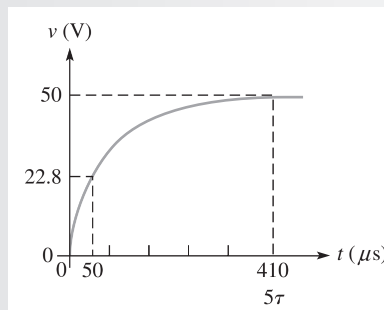


Solución La constante de tiempo es $RC = (8.2\text{ k}\Omega)(0.01\ \mu\text{F}) = 82\ \mu\text{s}$. El voltaje con el cual el capacitor se cargará por completo es de 50 V (éste es V_F). El voltaje inicial es cero. Advierta que 50 μs es menor que una constante de tiempo; así que el capacitor se cargará menos que un 63% del voltaje total en tal tiempo.

$$v_C = V_F(1 - e^{-t/RC}) = (50\text{ V})(1 - e^{-50\mu\text{s}/82\mu\text{s}})$$
$$= (50\text{ V})(1 - e^{-0.61}) = (50\text{ V})(1 - 0.543) = \mathbf{22.8\ V}$$

La curva de carga para el capacitor se muestra en la figura 12-33.

▶ **FIGURA 12–33**



Es posible determinar una función exponencial con la calculadora utilizando la tecla e^x e ingresando el valor del exponente de e.

Problema relacionado En la figura 12-32, determine el voltaje presente en el capacitor 15 μs después del cierre del interruptor.



Use el archivo Multisim E12-12 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Descarga a cero La fórmula para el caso especial en que una curva de voltaje exponencial decreciente finaliza en cero ($V_F = 0$), como se muestra en la figura 12-31(b), se deriva a partir de la fórmula general como sigue:

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} = 0 + (V_i - 0)e^{-t/RC}$$

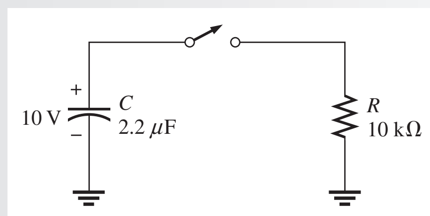
La cual se reduce a

$$v = V_i e^{-t/RC}$$ **Ecuación 12–20**

donde V_i es el voltaje al principio de la descarga. Se puede utilizar esta fórmula para calcular el voltaje de descarga en cualquier instante, como ilustra el ejemplo 12-13.

EJEMPLO 12–13 Determine el voltaje presente en el capacitor de la figura 12-34 en un punto en el tiempo 6 ms después de que se cierra el interruptor. Trace la curva de descarga.

▶ **FIGURA 12–34**

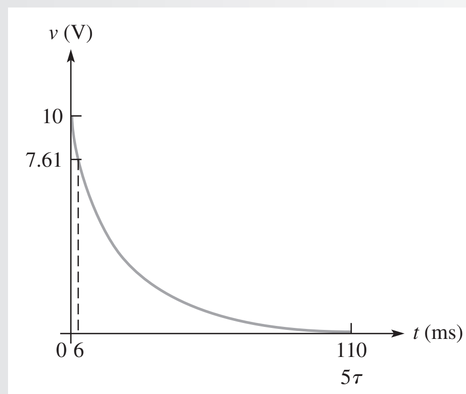


Solución La constante de tiempo de descarga es $RC = (10\ \text{k}\Omega)(2.2\ \mu\text{F}) = 22$ ms. El voltaje inicial en el capacitor es de 10 V. Advierta que 6 ms es menor que una constante de tiempo, de modo que el capacitor se descargará menos del 63%. Por consiguiente, tendrá un voltaje mayor que el 37% del voltaje inicial a los 6 ms.

$$v_C = V_i e^{-t/RC} = (10\ \text{V})e^{-6\text{ms}/22\text{ms}} = (10\ \text{V})e^{-0.27} = (10\ \text{V})(0.761) = \mathbf{7.61\ V}$$

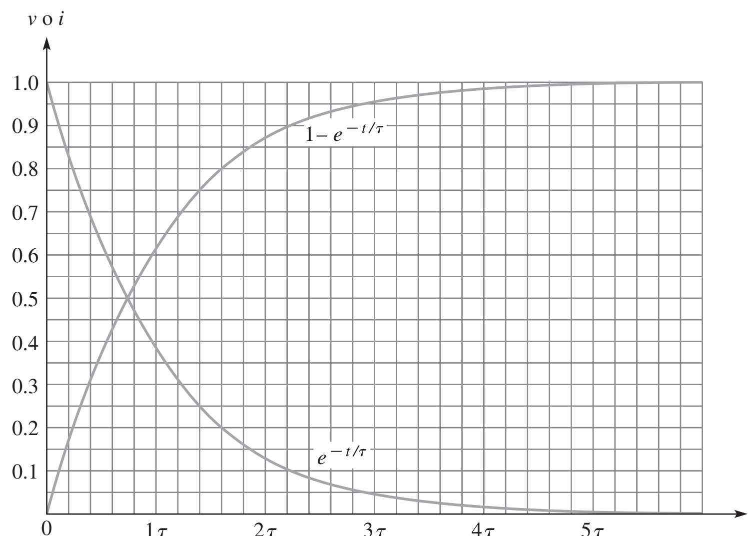
La curva de descarga para el capacitor se muestra en la figura 12-35.

▶ **FIGURA 12–35**



Problema relacionado En la figura 12-34, cambie R a 2.2 kΩ y determine el voltaje presente en el capacitor 1 ms después de que se cierra el interruptor.

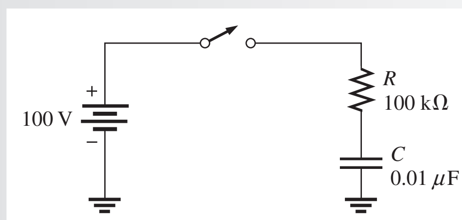
Método gráfico que utiliza curvas exponenciales universales Las curvas universales que aparecen en la figura 12-36 proporcionan una solución gráfica de la carga y descarga de un capacitor. El ejemplo 12-14 ilustra este método gráfico.



▲ **FIGURA 12–36**

Curvas exponenciales universales normalizadas.

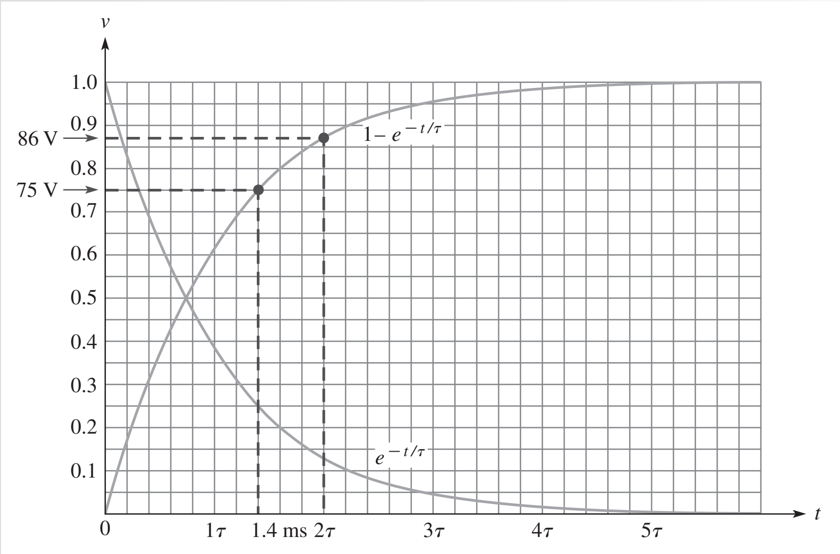
EJEMPLO 12–14 ¿Cuánto tiempo le llevará al capacitor inicialmente descargado que se muestra en la figura 12-37 para cargarse a 75 V? ¿Cuál es el voltaje en el capacitor 2 ms después de que se cierra el interruptor? Use las curvas exponenciales universales normalizadas que aparecen en la figura 12-36 para determinar las respuestas.



▲ **FIGURA 12–37**

Solución El voltaje de carga total es de 100 V, el cual está al nivel del 100% (1.0) en la escala vertical normalizada de la gráfica. El valor de 75 V es el 75% del valor máximo, o de 0.75 en la gráfica. Se puede ver que este valor ocurre en 1.4 constantes de tiempo. En este circuito, una constante de tiempo es $RC = (100\ \text{k}\Omega)(0.01\ \mu\text{F}) = 1\ \text{ms}$. Por consiguiente, el voltaje en el capacitor llega a 75 V a los 1.4 ms después de que se cierra el interruptor.

En la curva exponencial universal, se advierte que el capacitor está a aproximadamente 86 V (0.86 en el eje vertical) en 2 ms, lo que equivale a dos constantes de tiempo. Estas soluciones gráficas se muestran en la figura 12-38.



▲ FIGURA 12–38

Problema relacionado Con las curvas universales normalizadas, determine cuánto le llevará al capacitor de la figura 12-37 cargarse hasta 50 V. ¿Cuál es el voltaje en el capacitor 3 ms después de que se cierra el interruptor?



Use el archivo E12-14 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado. Use una onda cuadrada para reemplazar la fuente de voltaje de cd y el interruptor.

Tabla de porcentajes de constantes de tiempo En cada intervalo de constante de tiempo, los porcentajes de plena carga o descarga se calculan con las fórmulas exponenciales, o pueden ser tomados de las curvas universales exponenciales. Los resultados se resumen en las tablas 12-4 y 12-5.

▼ TABLA 12–4

Porcentaje de carga final después de cada intervalo de constante de tiempo de carga.

NÚMERO DE CONSTANTES DE TIEMPO	PORCENTAJE APROXIMADO DE CARGA FINAL
1	63
2	86
3	95
4	98
5	99 (considerado el 100%)

▼ TABLA 12–5

Porcentaje de carga inicial después de cada intervalo de constante de tiempo de descarga.

NÚMERO DE CONSTANTES DE TIEMPO	PORCENTAJE APROXIMADO DE CARGA INICIAL
1	37
2	14
3	5
4	2
5	1 (considerado el 0)

Determinación del tiempo

De vez en cuando, es necesario determinar cuánto le llevará a un capacitor cargarse o descargarse a un voltaje específico. Las ecuaciones 12-17 y 12-19 se pueden resolver para t si se especifi-

ca v. El logaritmo natural (abreviado ln) de $e^{-t/RC}$ es el exponente. Por consiguiente, tomando el logaritmo natural de ambos miembros de la ecuación se resuelve para el tiempo. Este procedimiento se realiza como sigue en el caso de la fórmula exponencial decreciente cuando $V_F = 0$ (Ecuación 12-20).

$$v = V_i e^{-t/RC}$$

$$\frac{v}{V_i} = e^{-t/RC}$$

$$\ln\left(\frac{v}{V_i}\right) = \ln e^{-t/RC}$$

$$\ln\left(\frac{v}{V_i}\right) = \frac{-t}{RC}$$

Ecuación 12–21

$$t = -RC\ln\left(\frac{v}{V_i}\right)$$

Se puede utilizar el mismo procedimiento para la fórmula exponencial creciente expresada por la ecuación 12-19 como sigue:

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC})$$

$$\frac{v}{V_F} = 1 - e^{-t/RC}$$

$$1 - \frac{v}{V_F} = e^{-t/RC}$$

$$\ln\left(1 - \frac{v}{V_F}\right) = \ln e^{-t/RC}$$

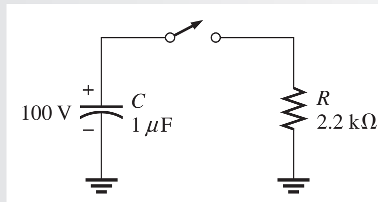
$$\ln\left(1 - \frac{v}{V_F}\right) = \frac{-t}{RC}$$

Ecuación 12–22

$$t = -RC\ln\left(1 - \frac{v}{V_F}\right)$$

EJEMPLO 12–15 En la figura 12-39, ¿cuánto le llevará al capacitor descargarse a 25 V cuando el interruptor se cierra?

▶ **FIGURA 12–39**



Solución Use la ecuación 12-21 para determinar el tiempo de descarga.

$$t = -RC\ln\left(\frac{v}{V_i}\right) = -(2.2\text{ k}\Omega)(1\ \mu\text{F})\ln\left(\frac{25\text{ V}}{100\text{ V}}\right)$$

$$= -(2.2\text{ ms})\ln(0.25) = -(2.2\text{ ms})(-1.39) = \mathbf{3.05\ ms}$$

Puede calcularse el ln(0.25) con la calculadora utilizando la tecla LN.

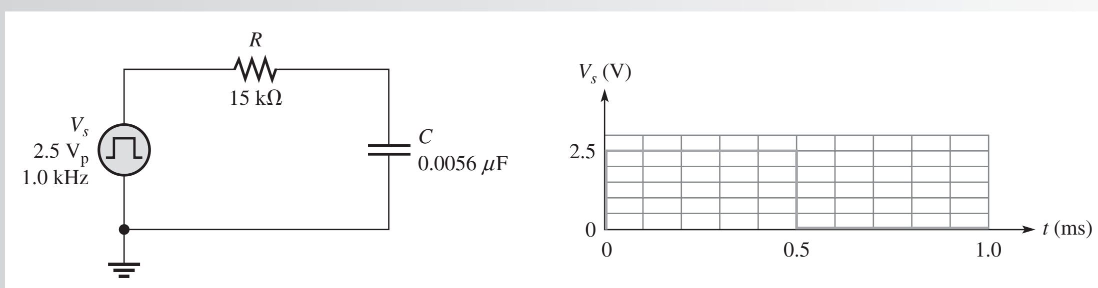
Problema relacionado ¿Cuánto le llevará al capacitor de la figura 12-39 descargarse hasta 50 V?

Respuesta *RC* a una onda cuadrada

Analicemos un caso común para ilustrar que la exponencial creciente y la decreciente ocurren cuando un circuito *RC* es excitado con una onda cuadrada que tiene un periodo largo en comparación con la constante de tiempo. La onda cuadrada produce una acción de encendido y apagado pero, a diferencia de un interruptor único, crea una trayectoria de descarga de retorno a través del generador cuando la onda se reduce otra vez a cero.

Cuando la onda cuadrada se eleva, el voltaje entre las terminales del capacitor se eleva exponencialmente hacia el valor máximo de la onda cuadrada en un lapso de tiempo que depende de la constante de tiempo. Cuando la onda cuadrada regresa al nivel de cero, el voltaje en el capacitor disminuye exponencialmente, de nuevo dependiendo de la constante de tiempo. La resistencia Thevenin del generador es una parte de la constante de tiempo *RC*; sin embargo, se puede omitir si es pequeña en comparación con *R*. El ejemplo 12-16 muestra las formas de onda para el caso en que el periodo es largo comparado con la constante de tiempo; se abordarán otros casos con todo detalle en el capítulo 20.

EJEMPLO 12–16 En la figura 12-40, calcule el voltaje entre las terminales del capacitor cada 0.1 ms durante un periodo completo de la entrada. Trace entonces la forma de onda del capacitor. Suponga que la resistencia Thevenin del generador es insignificante.



▲ **FIGURA 12–40**

Solución

$$\tau = RC = (15\,\text{k}\Omega)(0.0056\,\mu\text{F}) = 0.084\text{ ms}$$

El periodo de la onda cuadrada es de 1 ms, el cual es aproximadamente de 12τ. Esto significa que transcurrirán 6τ después de cada cambio del pulso, ello permite que el capacitor se cargue y descargue totalmente.

Para la exponencial creciente,

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC}) = V_F(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\text{En 0.1 ms: } v = 2.5\text{ V}(1 - e^{-0.1\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 1.74\text{ V}$$
$$\text{En 0.2 ms: } v = 2.5\text{ V}(1 - e^{-0.2\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 2.27\text{ V}$$
$$\text{En 0.3 ms: } v = 2.5\text{ V}(1 - e^{-0.3\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 2.43\text{ V}$$
$$\text{En 0.4 ms: } v = 2.5\text{ V}(1 - e^{-0.4\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 2.48\text{ V}$$
$$\text{En 0.5 ms: } v = 2.5\text{ V}(1 - e^{-0.5\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 2.49\text{ V}$$

Para la exponencial menguante,

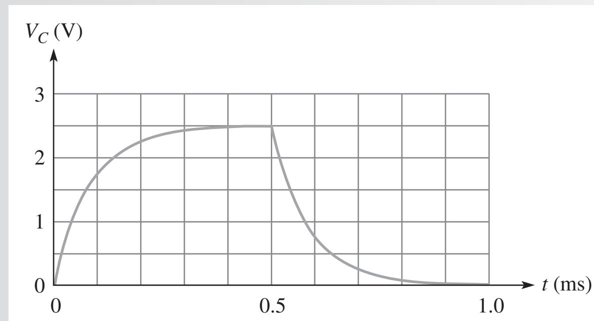
$$v = V_i(e^{-t/RC}) = V_i(e^{-t/\tau})$$

En la ecuación, el tiempo se muestra desde el punto en que ocurre el cambio (restando 0.5 ms del tiempo real). Por ejemplo, en 0.6 ms, $t = 0.6\text{ ms} - 0.5\text{ ms} = 0.1\text{ ms}$.

$$\text{En 0.6 ms: } v = 2.5\text{ V}(e^{-0.1\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 0.76\text{ V}$$
$$\text{En 0.7 ms: } v = 2.5\text{ V}(e^{-0.2\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 0.23\text{ V}$$
$$\text{En 0.8 ms: } v = 2.5\text{ V}(e^{-0.3\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 0.07\text{ V}$$
$$\text{En 0.9 ms: } v = 2.5\text{ V}(e^{-0.4\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 0.02\text{ V}$$
$$\text{En 1.0 ms: } v = 2.5\text{ V}(e^{-0.5\text{ms}/0.084\text{ms}}) = 0.01\text{ V}$$

La figura 12-41 es una gráfica de estos resultados.

▶ FIGURA 12–41



Problema relacionado ¿Cuál es el voltaje presente en el capacitor en 0.65 ms?

REPASO DE LA SECCIÓN 12-5

1. Determine la constante de tiempo cuando $R = 1.2\text{ k}\Omega$ y $C = 1000\text{ pF}$.
2. Si el circuito mencionado en la pregunta 1 se carga con una fuente de 5 V, ¿cuánto le llevará al capacitor alcanzar su carga plena? A plena carga, ¿cuál es el voltaje del capacitor?
3. Para un circuito dado, $\tau = 1$ ms. Si se carga con una batería de 10 V, ¿cuál será el voltaje en el capacitor en cada uno de los siguientes tiempos: 2 ms, 3 ms, 4 ms, y 5 ms?
4. Un capacitor se carga a 100 V. Si se descarga a través de un resistor, ¿cuál es el voltaje que hay en el capacitor en una constante de tiempo?

12–6 CAPACITORES EN CIRCUITOS DE CA

Como se sabe, un capacitor bloquea la corriente directa. Un capacitor deja pasar la corriente alterna pero con cierta cantidad de oposición, llamada reactancia capacitiva, que depende de la frecuencia de la corriente alterna.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar circuitos capacitivos de ca**
  - Explicar por qué un capacitor provoca cierto desfasamiento entre voltaje y corriente
  - Definir el término *reactancia capacitiva*
  - Determinar el valor de reactancia capacitiva en un circuito dado
  - Examinar la potencia instantánea, real o activa y reactiva en un capacitor

Para explicar a cabalidad cómo funcionan los capacitores en un circuito de ca, se debe introducir el concepto de derivada. *La derivada de una cantidad que varía con el tiempo es la razón de cambio instantánea de dicha cantidad*.

Recordemos que la corriente es la velocidad de flujo de la carga (electrones). Por consiguiente, la corriente instantánea, i, se expresa como la razón de cambio instantánea de la carga, q, con respecto al tiempo, t.

$$i = \frac{dq}{dt}$$ **Ecuación 12–23**

El término dq/dt es la derivada de q con respecto al tiempo y representa la razón de cambio instantánea de q. Asimismo, en función de cantidades instantáneas, $q = Cv$. Por consiguiente, de acuerdo con una regla básica del cálculo diferencial, la derivada de q con respecto al tiempo es $dq/dt = C(dv/dt)$. Como $i = dq/dt$, se obtiene la siguiente relación:

$$i = C\left(\frac{dv}{dt}\right)$$ **Ecuación 12–24**

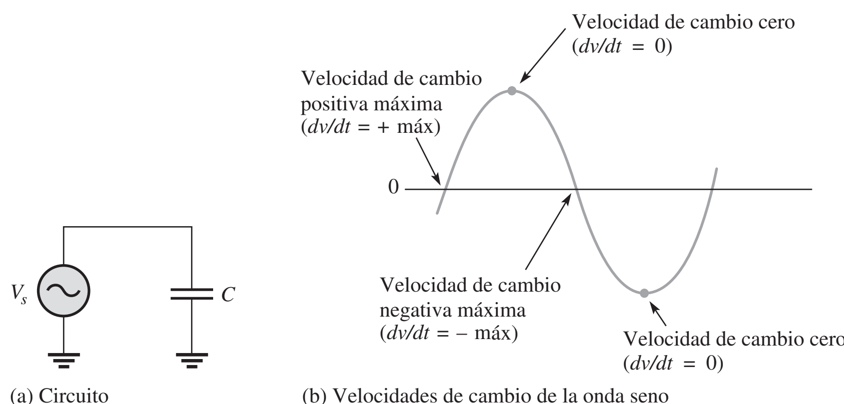
Esta fórmula establece que

> **La corriente instantánea en el capacitor es igual a la capacitancia multiplicada por la razón de cambio instantánea del voltaje presente entre las terminales del capacitor.**

Mientras más rápido cambia el voltaje entre las terminales de un capacitor, mayor es la corriente.

Relación de fase de corriente y voltaje en un capacitor

Considere lo que sucede cuando se aplica un voltaje sinusoidal entre las terminales de un capacitor, como se muestra en la figura 12-42(a). La forma de onda del voltaje tiene una razón de cambio máxima (dv/dt = máx) en los cruces por cero y velocidad de cambio de cero ($dv/dt = 0$) en los picos, según indica la figura 12-42(b).

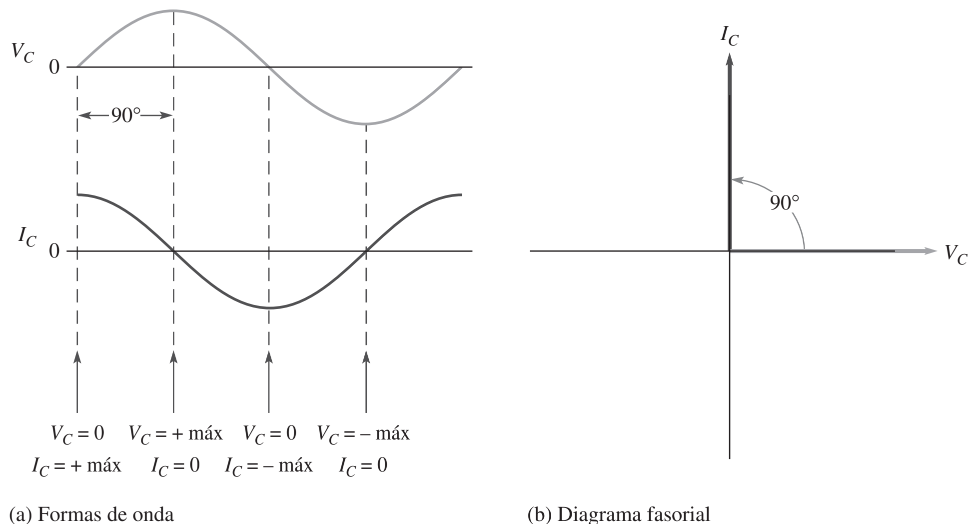


▲ **FIGURA 12–42**

Onda seno aplicada a un capacitor.

La relación de fase entre la corriente y el voltaje para el capacitor se establece con la ecuación 12-24. Cuando $dv/dt = 0$, i también es cero porque $i = C(dv/dt) = C(0) = 0$. Cuando dv/dt es un máximo que se dirige hacia positivo, i es un máximo positivo; cuando dv/dt es un máximo que se dirige hacia negativo, i es un máximo negativo.

En un circuito capacitivo, un voltaje sinusoidal siempre produce una corriente sinusoidal. Por tanto, es posible graficar la corriente con respecto al voltaje si se conocen los puntos en la curva de voltaje donde la corriente es de cero y donde es máxima. Esta relación aparece en la figura 12-43(a). Advierta que la corriente está adelantada en 90° con respecto al voltaje. Esto siempre se cumple en un circuito puramente capacitivo. La relación entre los fasores de voltaje y corriente se muestra en la figura 12-43(b).



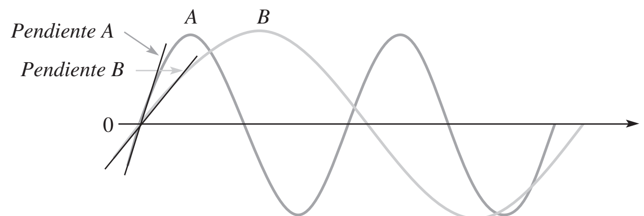
▶ **FIGURA 12–43**

Relación de fase de V_C e I_C en un capacitor. La corriente siempre se adelanta en 90° al voltaje del capacitor.

Reactancia capacitiva, X_C

La **reactancia capacitiva** es la oposición a la corriente sinusoidal, expresada en ohms. El símbolo para reactancia capacitiva es X_C.

En el desarrollo de una fórmula para X_C, se utiliza la relación $i = C(dv/dt)$ y la curva que aparece en la figura 12-44. La velocidad de cambio del voltaje está directamente relacionada con la frecuencia. Mientras más rápido cambia el voltaje, más alta es la frecuencia. Por ejemplo, en la figura 12-44 se observa que, en los cruces por cero, la pendiente de la onda seno *A* es más pronunciada que la de la onda seno *B*. La pendiente de una curva en un punto indica la velocidad de cambio en dicho punto. La onda seno *A* tiene frecuencia más alta que la onda seno *B*, como indica una velocidad máxima más grande (*dv*/*dt* es mayor en los cruces por cero).



▲ **FIGURA 12–44**

La forma de onda de frecuencia más alta (*A*) tiene una pendiente más pronunciada en sus cruces por cero, lo cual corresponde a una velocidad de cambio más alta.

Cuando se incrementa la frecuencia, *dv*/*dt* aumenta, y por tanto *i* se incrementa. Cuando la frecuencia disminuye, *dv*/*dt* disminuye, y por tanto, *i* disminuye.

$$\overset{\uparrow}{i} = C\overset{\uparrow}{(dv/dt)} \qquad \text{y} \qquad \underset{\downarrow}{i} = C\underset{\downarrow}{(dv/dt)}$$

Un incremento de *i* significa que hay menos oposición a la corriente (X_C es menor), y una disminución de *i* significa mayor oposición a la corriente (X_C es más grande). Por consiguiente, X_C es inversamente proporcional a *i*, y por tanto, es inversamente proporcional a la frecuencia.

X_C es inversamente proporcional a *f*, mostrada como $\frac{1}{f}$.

A partir de la misma relación $i = C(dv/dt)$, se observa que si dv/dt es constante y C varía, un incremento en C produce un incremento de i, y una disminución en C produce una disminución de i.

$$\overset{\uparrow}{i} = \overset{\uparrow}{C}(dv/dt) \quad \text{y} \quad \underset{\downarrow}{i} = \underset{\downarrow}{C}(dv/dt)$$

De nuevo, un incremento de i presupone menos oposición (X_C es menor), y una disminución de i presupone oposición (X_C es mayor). Por consiguiente, X_C es inversamente proporcional a i, y por tanto, inversamente proporcional a la capacitancia.

La reactancia capacitiva es inversamente proporcional tanto a f como a C.

X_C es inversamente proporcional a fC, mostrada como $\frac{1}{fC}$.

Hasta ahora, se ha determinado una relación proporcional entre X_C y $1/fC$. La ecuación 12-25 es la fórmula completa para calcular X_C. La derivación se proporciona en el apéndice B.

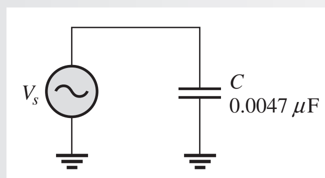
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Ecuación 12–25

La reactancia capacitiva, X_C, está en ohms cuando f está en hertz y C en farads. Advierta que 2π aparece en el denominador como una constante de proporcionalidad. Este término se deriva a partir de la relación de onda seno al movimiento de rotación.

EJEMPLO 12–17 Se aplica un voltaje sinusoidal a un capacitor, como indica la figura 12-45. La frecuencia de la onda senoidal es de 1 kHz. Determine la reactancia capacitiva.

▶ FIGURA 12–45



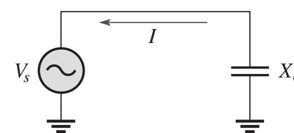
Solución $$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1 \times 10^3\ \text{Hz})(0.0047 \times 10^{-6}\ \text{F})} = \mathbf{33.9\ k\Omega}$$

Problema relacionado Determine la frecuencia requerida para lograr que la reactancia capacitiva mostrada en la figura 12-45 sea igual a 10 kΩ.



Use el archivo Multisim E12-17 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

Ley de Ohm La reactancia de un capacitor es análoga a la resistencia de un resistor, según muestra la figura 12-46. De hecho, ambas se expresan en ohms. En vista de que tanto R como X_C son formas de oposición a la corriente, la ley de Ohm es aplicable a circuitos capacitivos y resistivos.



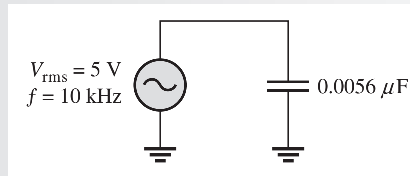
▲ FIGURA 12–46

$$I = \frac{V}{X_C}$$

Cuando se aplica la ley de Ohm en circuitos de ca, tanto la corriente como el voltaje se deben expresar de igual manera, es decir, ambos en valores rms, ambos en valores pico, y así sucesivamente.

EJEMPLO 12–18 En la figura 12-47, determine la corriente rms.

▶ **FIGURA 12–47**



Solución En primer lugar, determine la reactancia capacitiva.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10 \times 10^3\,\text{Hz})(0.0056 \times 10^{-6}\,\text{F})} = 2.84\,\text{k}\Omega$$

Luego aplique la ley de Ohm.

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{X_C} = \frac{5\,\text{V}}{2.84\,\text{k}\Omega} = \mathbf{1.76\,mA}$$

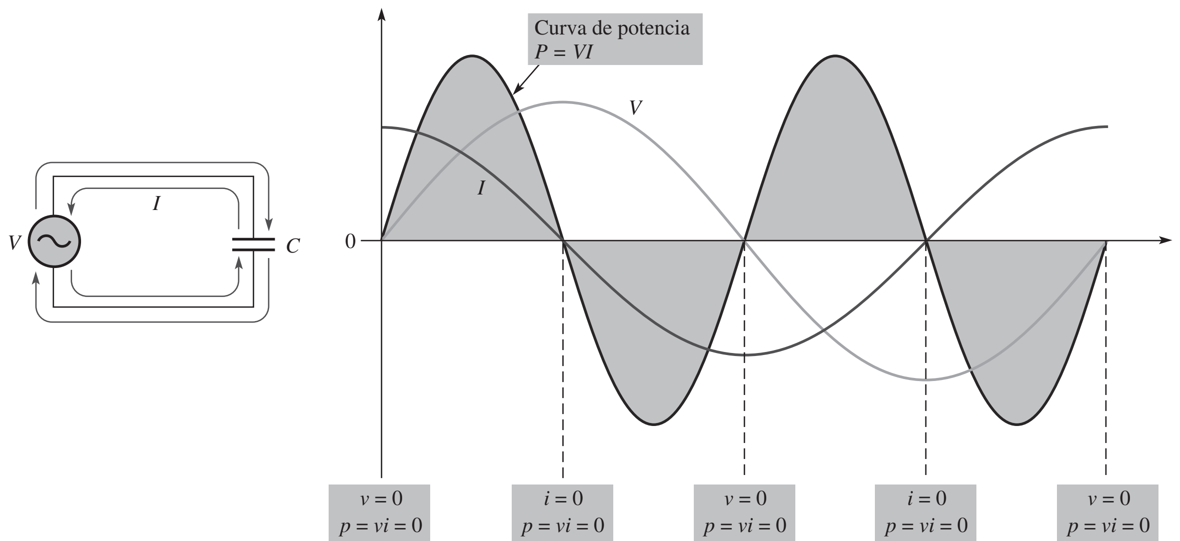
Problema relacionado En la figura 12-47, cambie la frecuencia a 25 kHz y determine la corriente rms.



Use el archivo Multisim E12-18 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Potencia en un capacitor

Tal como fue analizado con anterioridad en este capítulo, un capacitor cargado almacena energía en el campo eléctrico dentro del dieléctrico. Un capacitor ideal no disipa energía; sólo la guarda temporalmente. Cuando se aplica un voltaje de ca a un capacitor, éste guarda energía durante una parte del ciclo de voltaje; luego la energía guardada regresa a la fuente durante otra parte del ciclo. No hay pérdida neta de energía. La figura 12-48 muestra la curva de potencia que resulta a partir de un ciclo del voltaje y de la corriente en el capacitor.



▲ **FIGURA 12–48**

Curva de potencia.

Potencia instantánea (p) El producto de v por i da **potencia instantánea.** En puntos donde v o i son cero, p también es cero. Cuando tanto v como i son positivos, p también es positiva. Cuando v o i son uno positivo y el otro negativo, p es negativa. Si v e i son negativos, p es positiva. Como se puede advertir, la potencia sigue una curva de forma sinusoidal. Los valores positivos de potencia indican que el capacitor guarda energía; los valores negativos de potencia indican que la energía regresa del capacitor a la fuente. Observe que la potencia fluctúa a una frecuencia que es dos veces la del voltaje o de la corriente conforme la energía se guarda o regresa hacia la fuente de modo alterno.

Potencia real o activa P De manera ideal, toda la energía guardada por un capacitor durante la parte positiva del ciclo de potencia se regresa a la fuente durante la parte negativa. No se pierde energía neta por causa de la conversión de calor en el capacitor, de modo que la **potencia real** es de cero. En realidad, debido a fugas y a la resistencia de las laminillas en un capacitor práctico, un pequeño porcentaje de la potencia total se disipa en forma de potencia real.

Potencia reactiva Q La razón a la cual un capacitor guarda o regresa energía se conoce como **potencia reactiva**. La potencia reactiva es una cantidad distinta de cero porque, en cualquier instante, el capacitor realmente está tomando energía de la fuente o regresándola a ésta. La potencia reactiva no representa pérdida de energía. Las fórmulas siguientes son aplicables:

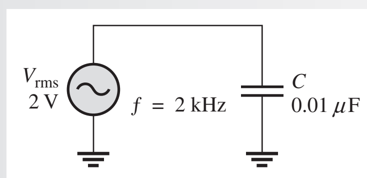
$$P_r = V_{\text{rms}}I_{\text{rms}}$$ **Ecuación 12–26**

$$P_r = \frac{V_{\text{rms}}^2}{X_C}$$ **Ecuación 12–27**

$$P_r = I_{\text{rms}}^2 X_C$$ **Ecuación 12–28**

Observe que estas ecuaciones son de la misma forma que las presentadas en el capítulo 4 para la potencia de un resistor. El voltaje y la corriente están expresados en rms. La unidad de potencia reactiva es el **VAR (volt-ampere reactivo)**.

EJEMPLO 12–19 Determine la potencia real y la potencia reactiva en la figura 12-49.



▲ FIGURA 12–49

Solución Para un capacitor ideal, la potencia real P_{real}, siempre es de **cero**. La potencia reactiva se determina encontrando primero el valor de la reactancia capacitiva y utilizando luego la ecuación 12-27.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(2 \times 10^3\ \text{Hz})(0.01 \times 10^{-6}\ \text{F})} = 7.96\ \text{k}\Omega$$

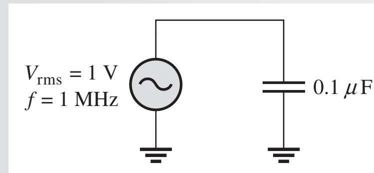
$$P_r = \frac{V_{\text{rms}}^2}{X_C} = \frac{(2\ \text{V})^2}{7.96\ \text{k}\Omega} = 503 \times 10^{-6}\ \text{VAR} = \mathbf{503\ \mu VAR}$$

Problema relacionado Si en la figura 12-49 se duplica la frecuencia, ¿cuáles son la potencia real P_{real} y la potencia reactiva Q?

REPASO DE LA SECCIÓN 12-6

1. Enuncie la relación que hay entre corriente y voltaje en un capacitor.
2. Calcule X_C con $f = 5$ kHz y $C = 50$ pF.
3. ¿A qué frecuencia es la reactancia de un capacitor de 0.1 μF igual a 2 kΩ?
4. Calcule la corriente rms en la figura 12-50.
5. Se conecta un capacitor de 1 μF a una fuente de voltaje de ca de 12 V rms. ¿Cuál es la potencia verdadera?
6. En la pregunta 5, determine la potencia reactiva a una frecuencia de 500 Hz.

▶ FIGURA 12–50



12–7 APLICACIONES DE LOS CAPACITORES

Los capacitores son ampliamente utilizados en muchas aplicaciones eléctricas y electrónicas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar algunas aplicaciones de capacitor**
  - Describir un filtro de fuente de potencia
  - Explicar el propósito de los capacitores de acoplamiento y de desvío (o de bypass)
  - Analizar los fundamentos de capacitores aplicados a circuitos sintonizados, circuitos temporizadores, y memorias de computadora

Si se elige cualquier tarjeta de circuito, se abre la fuente de potencia o se examina el interior de cualquier pieza de equipo electrónico, es muy probable que se encuentren capacitores de uno u otro tipo. Estos componentes se utilizan por una amplia variedad de razones tanto en aplicaciones de ca como de cd.

Almacenamiento eléctrico

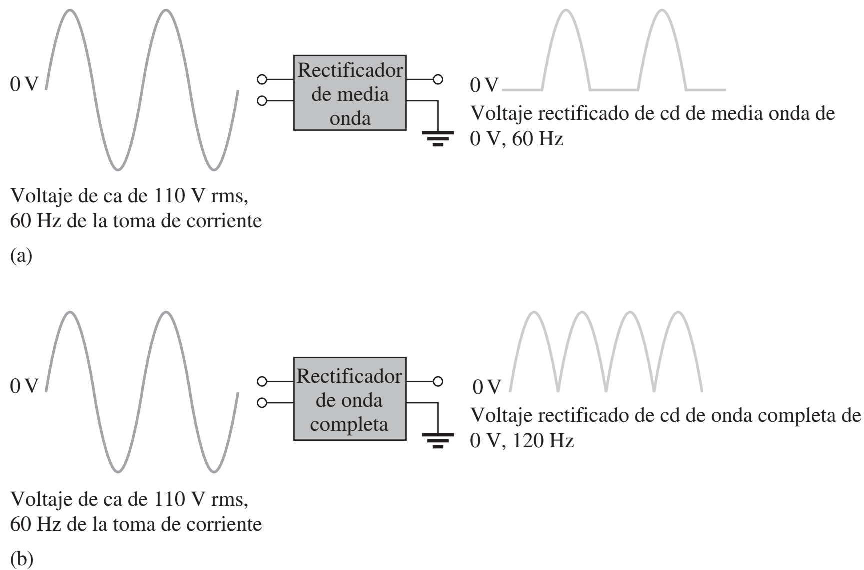
Una de las aplicaciones básicas de un capacitor es como una fuente de voltaje de respaldo en circuitos de baja potencia, tales como ciertos tipos de memorias de semiconductor en computadoras. Esta aplicación en particular requiere de un muy alto valor de capacitancia y fugas insignificantes.

El capacitor de almacenamiento se conecta entre la entrada de la fuente de potencia de cd al circuito y tierra. Cuando el circuito está funcionando con su fuente de potencia normal, el capacitor permanece totalmente cargado al voltaje de la fuente de potencia de cd. Si se interrumpe, por la remoción efectiva de la fuente del circuito, el capacitor de almacenamiento se transforma temporalmente en fuente de potencia para el circuito.

Un capacitor suministra voltaje y corriente a un circuito en tanto su carga sea suficiente. Conforme el circuito extrae corriente, se remueve carga del capacitor y el voltaje disminuye. Por esta razón, el capacitor de almacenamiento sólo puede ser utilizado como fuente de potencia temporal. El periodo durante el cual un capacitor es capaz de suministrar suficiente potencia al circuito depende de la capacitancia y de la cantidad de corriente extraída por el circuito. Mientras más pequeña es la corriente y más alta es la capacitancia, mayor es el tiempo durante el cual el capacitor es capaz de suministrar potencia a un circuito.

Filtrado en una fuente de potencia

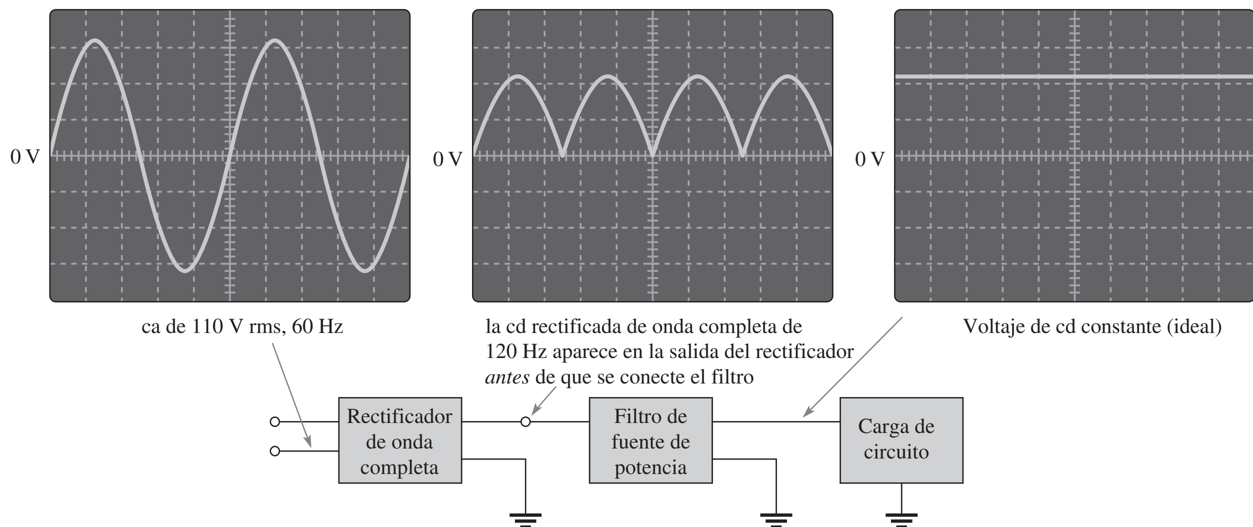
Una fuente de potencia de cd básica consta de un circuito conocido como **rectificador** seguido por un **filtro**. El rectificador convierte el voltaje sinusoidal de 110 V, 60 Hz suministrado por una toma de corriente estándar en un voltaje pulsante de cd que puede ser o voltaje rectificado de media onda o voltaje rectificado de onda completa, según el tipo de circuito rectificador. Como se muestra en la figura 12-51(a), un rectificador de media onda elimina cada uno de los medios ciclos negativos del voltaje sinusoidal. De acuerdo con la figura 12.51(b), un rectificador de onda completa en realidad invierte la polaridad de la parte negativa de cada ciclo. Tanto los voltajes de media onda como los de onda completa son de cd porque aún cuando cambian, su polaridad no alterna.



◀ **FIGURA 12–51**

Operación de rectificador de media onda y de onda completa.

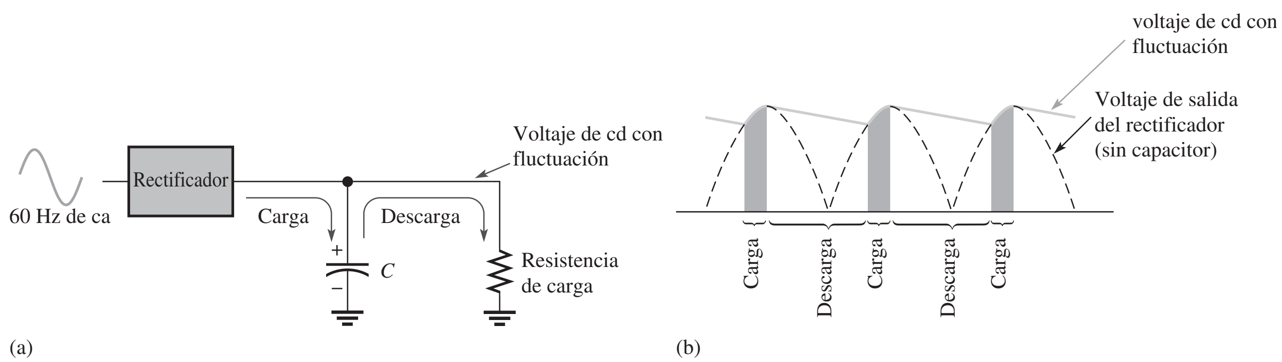
Para que pueda proporcionar potencia a circuitos electrónicos, el voltaje rectificado debe ser cambiado a voltaje de cd porque todos los circuitos requieren potencia constante. El filtro elimina casi por completo las fluctuaciones en el voltaje rectificado e idealmente proporciona un voltaje de cd de valor constante a la carga que es el circuito electrónico, como indica la figura 12-52.



▲ **FIGURA 12–52**

Formas de onda básicas que muestran la operación de una fuente de potencia de cd.

El capacitor como filtro de una fuente de potencia Se utilizan capacitores como filtros en fuentes de potencia de cd por su capacidad de guardar carga eléctrica. La figura 12-53(a) muestra una fuente de potencia de cd con un rectificador de onda completa y un capacitor filtro. La operación se describe desde un punto de vista de carga y descarga como sigue: supongamos que inicialmente el capacitor está descargado. Cuando la fuente de potencia se activa por primera vez y ocurre el primer ciclo de voltaje rectificado, el capacitor se cargará de inmediato gracias a la baja resistencia directa del rectificador. El voltaje en el capacitor seguirá la curva de voltaje rectificado hasta el pico del voltaje rectificado. Conforme el voltaje rectificado pasa por el pico y comienza a disminuir, el capacitor comenzará a descargarse muy lentamente a través de la alta resistencia del circuito de carga, como indica la figura 12-53(b). La cantidad de descarga es por lo general muy pequeña, pero en la figura aparece exagerada sólo para cumplir los propósitos de ilustración. El siguiente ciclo del voltaje rectificado recargará el capacitor de nuevo al valor pico reponiendo la pequeña cantidad de carga perdida desde el pico previo. Este patrón de una pequeña cantidad de carga y descarga continúa en tanto la potencia esté activa.



▲ **FIGURA 12–53**

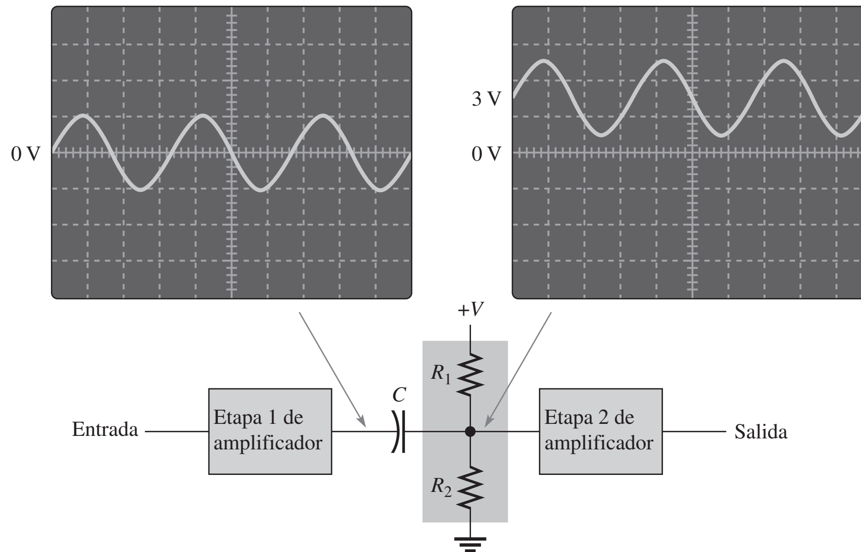
Operación básica de un capacitor filtro de fuente de potencia.

Se diseña un rectificador de modo que admita corriente sólo en una dirección para cargar el capacitor. Éste no se descargará de nuevo a través del rectificador sino que sólo descargará una pequeña cantidad mediante la resistencia relativamente alta de la carga. La pequeña oscilación del voltaje debido a la carga y descarga del capacitor se llama **voltaje de fluctuación.** Una buena fuente de potencia de cd tiene una cantidad muy pequeña de fluctuación en su salida de cd. La constante de tiempo de descarga de un capacitor filtro de fuente de potencia depende de su capacitancia y de la resistencia de la carga; por consiguiente, mientras más alto es el valor de capacitancia, el tiempo de descarga es mayor y, por tanto, más pequeño es el voltaje de fluctuación.

Bloqueo de cd y acoplamiento de ca

Con el fin de bloquear el voltaje de cd constante en una parte de un circuito para que no llegue a otra parte, por lo común se utilizan capacitores. Como un ejemplo de esto, se conecta un capacitor entre dos etapas de un amplificador para evitar que el voltaje de cd a la salida de la etapa 1 afecte el voltaje de cd a la entrada de la etapa 2, según ilustra la figura 12-54. Supongamos que, para una operación apropiada, la salida de la etapa 1 tiene un voltaje de cd igual a cero y la entrada a la etapa 2 tiene un voltaje de cd igual a 3 V. El capacitor impide que el voltaje de cd de 3 V en la etapa 2 llegue a la salida de la etapa 1 y afecte su valor de cero y viceversa.

Si se aplica un voltaje de señal sinusoidal a la entrada de la etapa 1, el voltaje de señal se incrementa (amplifica) y aparece a la salida de la etapa 1, según muestra la figura 12-54. El voltaje de señal amplificado se acopla entonces, por conducto del capacitor, a la entrada de la etapa 2, donde se superpone sobre el nivel de cd de 3 V y luego de nuevo es amplificado mediante la etapa 2. Para que el voltaje de señal pase a través del capacitor sin que se reduzca, el capacitor debe ser lo suficientemente grande a fin de que su reactancia a la frecuencia del voltaje de señal resul-



▲ **FIGURA 12–54**

Aplicación de un capacitor para bloquear cd y acoplar ca en un amplificador.

te insignificante. En este tipo de aplicación, el capacitor se conoce como *capacitor de acoplamiento*, el cual aparece idealmente como una abertura ante cd y como un corto ante ca. Conforme se reduce la frecuencia de señal, la reactancia capacitiva se incrementa y, en algún punto, la reactancia capacitiva llega a ser lo suficientemente grande como para reducir de manera significativa el voltaje de ca entre las etapas 1 y 2.

Desacoplamiento de línea de potencia

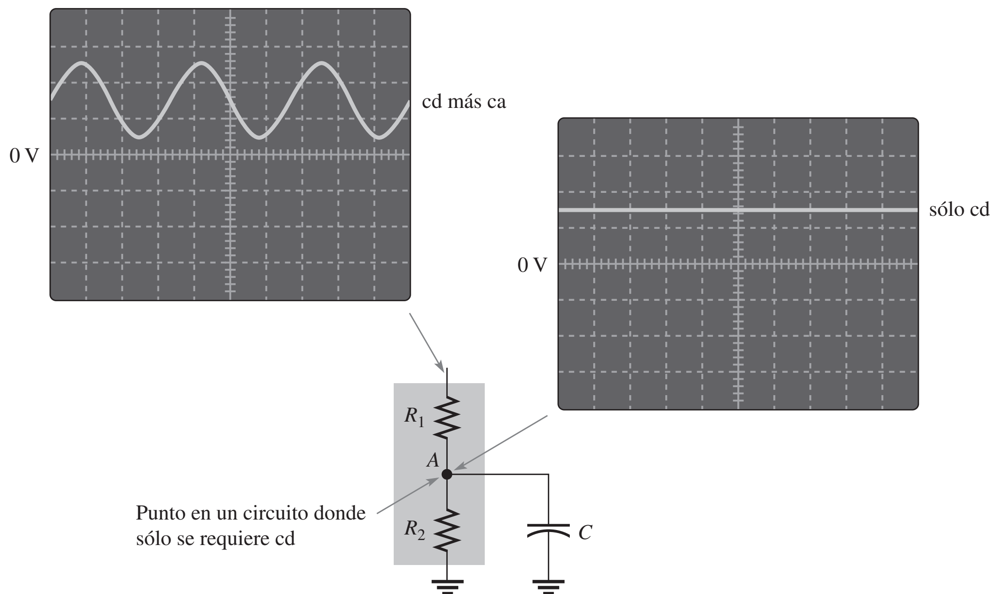
En tarjetas de circuito, para desacoplar los transitorios o pulsos estrechos de voltaje indeseables que ocurren en el voltaje de suministro de cd debido a circuitos digitales de rápida conmutación, se utilizan capacitores conectados desde la línea de voltaje de la fuente de cd hasta tierra. Un transitorio de voltaje contiene frecuencias altas que pueden afectar la operación de los circuitos. Estos transitorios se ponen en cortocircuito a tierra mediante la baja reactancia de los capacitores de desacoplamiento. En una tarjeta de circuito, a menudo se utilizan varios capacitores de desacoplamiento en diversos puntos localizados a lo largo de la línea de suministro de voltaje.

Desvío (bypass)

Otra aplicación de capacitor es desviar un voltaje de ca presente alrededor de un resistor en un circuito sin afectar el voltaje de cd que haya entre las terminales del resistor. En circuitos de amplificador, por ejemplo, se requieren voltajes de cd, llamados *voltajes de polarización*, en diversos puntos. Para que el amplificador opere apropiadamente, ciertos voltajes de polarización deben permanecer constantes y, por consiguiente, cualesquiera voltajes de ca deben ser removidos. Un capacitor lo suficientemente grande conectado desde un punto de polarización hasta tierra produce una trayectoria de baja reactancia a tierra para voltajes de ca, y deja el voltaje de polarización de cd constante en el punto dado. A frecuencias bajas, el capacitor de desvío pierde eficiencia debido a que su reactancia se incrementa. Esta aplicación de desvío se ilustra en la figura 12-55.

Filtros de señal

Los capacitores son esenciales para completar la operación de una clase de circuitos llamados *filtros*, los cuales se utilizan para seleccionar una señal de ca con cierta frecuencia especificada de



▲ **FIGURA 12–55**

Ejemplo de la operación de un capacitor de desvío. El punto A se localiza en la tierra de ca debido a la trayectoria de baja reactancia a través del capacitor.

entre una amplia variedad de señales con muchas frecuencias diferentes, o para seleccionar cierta banda de frecuencias y eliminar todas las demás frecuencias. Un ejemplo común de esta aplicación se encuentra en receptores de radio y televisión, donde es necesario seleccionar la señal transmitida desde una estación dada e eliminar o filtrar las señales emitidas desde todas las demás estaciones localizadas en el área.

Cuando se sintoniza un radio o una televisión, en realidad se está cambiando la capacitancia del circuito sintonizador (el cual es un tipo de filtro) de modo que únicamente la señal de la estación o del canal que se desea sintonizar pase a través de los circuitos del receptor. Se utilizan capacitores junto con resistores, inductores (estudiados en el siguiente capítulo), y los demás componentes en estos tipos de filtro. El tema de filtros se tratará en el capítulo 18.

La característica principal de un filtro es su selectividad de frecuencia, la cual está basada en el hecho de que la reactancia de un capacitor depende de la frecuencia ($X_C = 1/2\pi fC$).

Circuitos temporizadores

Otra área importante en la cual se utilizan capacitores es en circuitos temporizadores que generan retrasos específicos o producen formas de onda con características especiales. Recuerde que la constante de tiempo de un circuito con resistencia y capacitancia puede ser controlada seleccionando valores apropiados para R y C. El tiempo de carga de un capacitor se utiliza como retraso básico en varios tipos de circuito. Un ejemplo es el circuito que controla las luces direccionales de un automóvil, las cuales se encienden y apagan a intervalos regulares.

Memorias de computadora

En las computadoras, las memorias dinámicas utilizan capacitores minúsculos como elemento de almacenamiento básico de información binaria, la cual se compone de dos dígitos binarios, 1 y 0. Un capacitor cargado puede representar un 1 almacenado, y un capacitor descargado puede representar un 0 guardado. Patrones de unos y ceros que constituyen datos binarios se guardan en una memoria consistente en una agrupación ordenada de capacitores con circuitos asociados. Este tema se estudia en un curso de fundamentos de computadoras o de fundamentos digitales.

REPASO DE LA SECCIÓN 12-7

1. Explique cómo se reducen las oscilaciones o alisan los voltajes de cd de media onda o de onda completa por medio de un capacitor filtro.
2. Explique la finalidad de un capacitor de acoplamiento.
3. ¿Qué tan grande debe ser un capacitor de acoplamiento?
4. Explique el propósito de un capacitor de desacoplamiento.
5. Analice por qué la relación de frecuencia y reactancia capacitiva es importante en circuitos selectores de frecuencia tales como filtros de señales.
6. ¿Cuál característica de un capacitor es más importante en aplicaciones de retraso?

12–8 CIRCUITOS DE CAPACITOR CONMUTADOS

Se aplican capacitores en agrupamientos ordenados analógicos programables, los cuales se implementan en forma de circuito integrado (CI). Se utilizan capacitores conmutados para implementar varios tipos de circuitos analógicos programables en los cuales los capacitores toman el lugar de los resistores. En un "chip" de CI se pueden implementar capacitores con más facilidad que un resistor, y ofrecen otras ventajas tales como disipación de potencia cero. Cuando se requiere resistencia en un circuito, se puede hacer que el capacitor conmutado emule un resistor. Con el uso de emulación por medio de capacitor conmutado, se pueden cambiar con facilidad los valores de resistor mediante reprogramación y es posible alcanzar valores de resistencia precisos y estables.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir la operación básica de circuitos con capacitor conmutado**
  - Explicar cómo los circuitos de capacitor conmutado emulan resistores

Recuerde que la corriente se define en función de carga y tiempo t como

$$I = \frac{Q}{t}$$

Esta fórmula expresa que la corriente es la velocidad a la cual fluye carga a través de un circuito. Asimismo, recuerde que la definición básica de carga en función de capacitancia y voltaje es

$$Q = CV$$

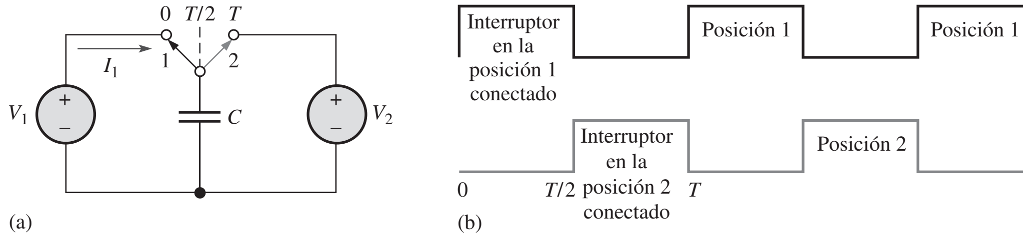
Al sustituir Q por CV, la corriente se expresa como

$$I = \frac{CV}{t}$$

Operación básica

En la figura 12-56 se muestra un modelo general de un circuito de capacitor conmutado. Consta de un capacitor, dos fuentes de voltaje arbitrarias (V_1 y V_2), y un interruptor de dos polos. Examinemos este circuito para un periodo de tiempo específico, T, el cual luego se repite. Supongamos que V_1 y V_2 permanecen constantes durante este periodo. De particular interés es la corriente promedio I_1 producida por la fuente V_1 durante el periodo, T.

Durante la primera mitad del periodo T, el interruptor se encuentra en la posición 1, como se indica en la figura 12-56. Por consiguiente, existe una corriente I_1 producida por V_1 que carga el capacitor durante el intervalo que va de $t = 0$ a $t = T/2$. En el transcurso de la segunda mitad



▲ **FIGURA 12–56**

Operación básica de un circuito de capacitor conmutado. El símbolo de fuente de voltaje representa un símbolo que varía con el tiempo.

del periodo, el interruptor se encuentra en la posición 2, como se indica, y no hay corriente producida por V_1; así, la corriente promedio producida por V_1 durante el periodo T es

$$I_{1(\text{prom})} = \frac{Q_{1(T/2)} - Q_{1(0)}}{T}$$

$Q_{1(0)}$ es la carga en el instante $t = 0$, y $Q_{1(T/2)}$ es la carga en el instante $t = T/2$. Por tanto, $Q_{1(T/2)} - Q_{1(0)}$ es la carga neta transferida mientras el interruptor está en la posición 1.

El voltaje presente en el capacitor en $T/2$ es igual a V_1, y en 0 o en T es igual a V_2. Utilizando la fórmula $Q = CV$ y sustituyendo en la ecuación previa, se obtiene

$$I_{1(\text{prom})} = \frac{CV_{1(T/2)} - CV_{2(0)}}{T} = \frac{C(V_{1(T/2)} - V_{2(0)})}{T}$$

Como V_1 y V_2 se suponen constantes en el periodo T, la corriente promedio se expresa como

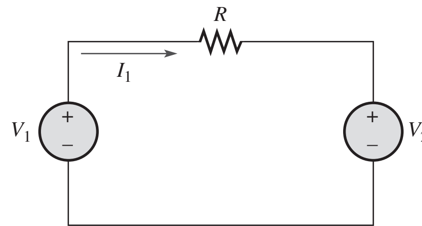
Ecuación 12–29

$$I_{1(\text{prom})} = \frac{C(V_1 - V_2)}{T}$$

La figura 12-57 muestra un circuito equivalente con un resistor en lugar del capacitor e interruptores.

▶ **FIGURA 12–57**

Circuito resistivo.



Al aplicar la ley de Ohm al circuito resistivo, la corriente es

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

En el circuito de capacitor conmutado se establece $I_{1(\text{prom})}$ igual a la corriente que circula en el circuito resistivo, y se tiene

$$\frac{C(V_1 - V_2)}{T} = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

Al eliminar los términos $V_1 - V_2$ y resolviendo para R se obtiene la resistencia equivalente.

Ecuación 12–30

$$R = \frac{T}{C}$$

Este importante resultado comprueba que un circuito de capacitor conmutado puede emular un resistor con un valor determinado en el tiempo T y con capacitancia C. Recuerde que el interruptor ocupa cada una de las posiciones durante la mitad del periodo T y que T puede ser variado

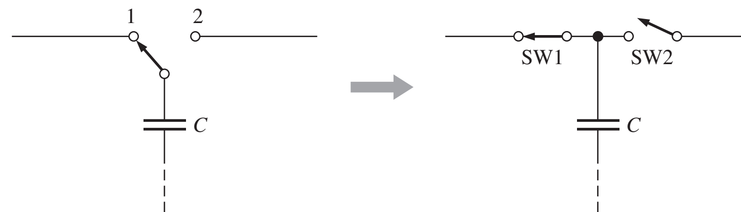
cambiando la frecuencia a la cual operan los interruptores. En un dispositivo analógico programable, la frecuencia de conmutación es un parámetro programable para cada resistor emulado y puede ser ajustado para lograr un valor de resistor preciso. Como $T = 1/f$, la resistencia en función de la frecuencia es

$$R = \frac{1}{fC}$$

Ecuación 12–31

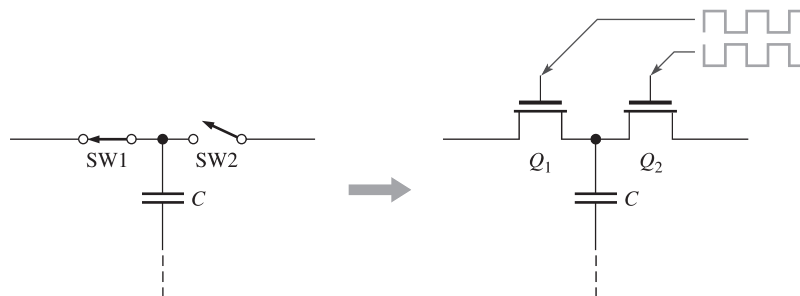
Interruptores prácticos

El interruptor de dos polos que se ha utilizado para ilustrar el concepto básico de un circuito de capacitor conmutado es una forma poco práctica de implementación en un amplificador programable u otro circuito analógico. La figura 12-58 muestra cómo el interruptor de dos polos simple puede ser reemplazado por dos interruptores de polo único en una analogía mecánica. Se puede advertir que cuando SW1 se cierra y SW2 se abre, esto equivale al interruptor de dos polos en la posición 1. Cuando SW1 está abierto y SW2 está cerrado, equivale al interruptor de dos polos en la posición 2.



◀ **FIGURA 12–58**
Analogía de interruptor mecánico.

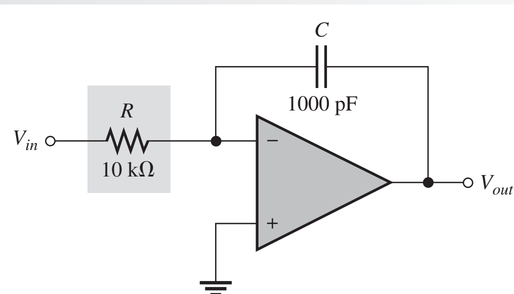
En circuitos electrónicos los interruptores se implementan con transistores. En la figura 12-59 se muestra un circuito de capacitor conmutado con dos transistores (Q_1 y Q_2) que actúan como interruptores. Sus tiempos de *encendido* y *apagado* son controlados mediante voltajes de forma de onda pulsante programables. Las dos formas de onda pulsantes que encienden y apagan los transistores están desfasadas en 180°, de modo que cuando un transistor está *encendido* el otro está *apagado*, y viceversa, sin traslaparse.



◀ **FIGURA 12–59**
Un capacitor conmutado con interruptores de transistor.

EJEMPLO 12–20 Reemplace el resistor de entrada, *R*, mostrado en el circuito amplificador de la figura 12-60 con un circuito de capacitor conmutado. El símbolo triangular representa un amplificador operacional, el cual se estudia en un curso posterior. Por ahora lo único que interesa es el resistor de entrada.

▶ **FIGURA 12–60**



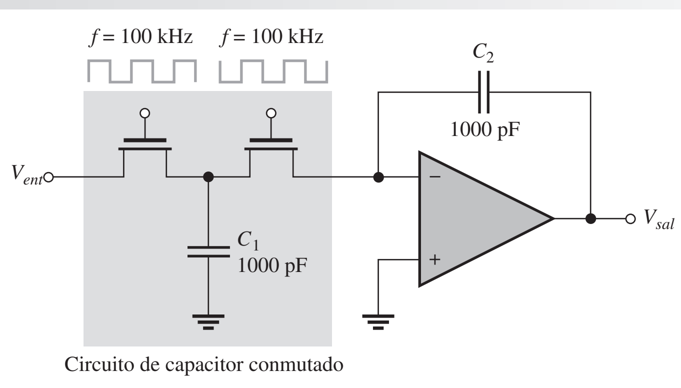
Solución Suponga que el valor del capacitor conmutado es de 1000 pF. Usted desea que el capacitor conmutado emule un resistor de 10 kΩ y proporcione efectivamente la misma corriente promedio que el resistor real. Utilizando la fórmula $R = T/C$,

$$T = RC = (10\,\text{k}\Omega)(1000\,\text{pF}) = 10\,\mu\text{s}$$

Esto significa que cada interruptor debe ser operado a una frecuencia de

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\,\mu\text{s}} = \mathbf{100\,kHz}$$

El ciclo de trabajo es del 50%, de modo que el interruptor ocupa cada posición a la mitad del periodo. Se aplican dos voltajes de ciclo de trabajo al 50% de 100 kHz no traslapados, desfasados en 180° entre sí, a los interruptores de transistor mostrados en la figura 12-61.

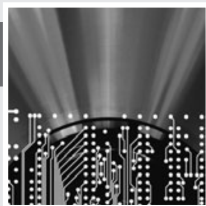


▶ **FIGURA 12–61**
Capacitor conmutado equivalente al circuito de la figura 12-60.

Problema relacionado ¿A qué frecuencia deben ser operados los interruptores de transistor en la figura 12-61 para emular un resistor de 5.6 kΩ?

REPASO DE LA SECCIÓN 12-8

1. **¿Cómo emula un capacitor conmutado a un resistor?**
2. **¿Qué factores determinan el valor de resistencia que un determinado circuito de capacitor conmutado puede emular?**
3. **En una implementación práctica, ¿qué dispositivos se utilizan como interruptores?**

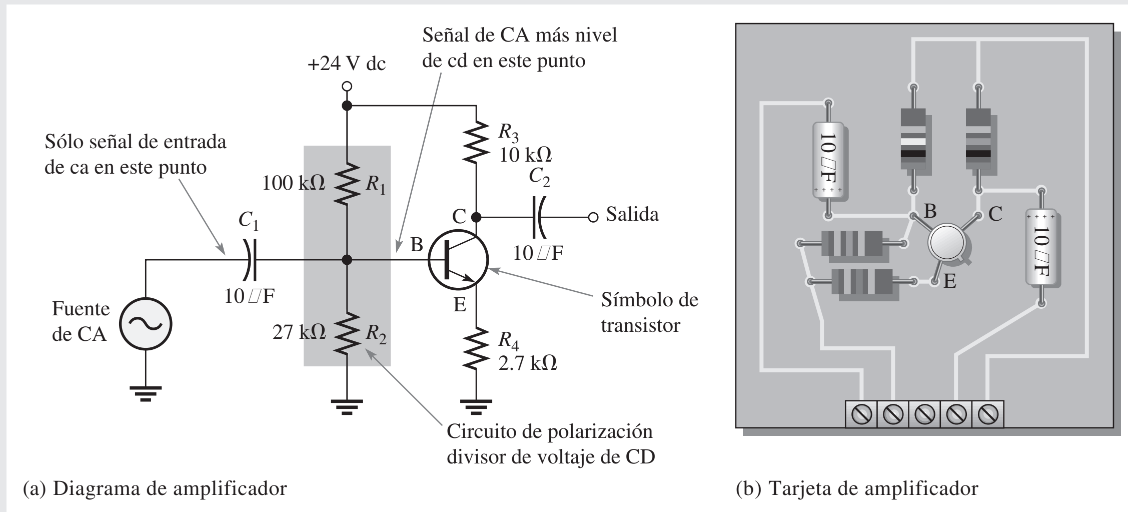


Una aplicación de circuito

En ciertos tipos de amplificadores se utilizan capacitores para acoplar la señal de ca al mismo tiempo que se bloquea el voltaje de cd. Se utilizan capacitores en muchas otras aplicaciones, pero en ésta, usted se enfocará en los capacitores de acoplamiento empleados en un circuito amplificador. Este tema se introdujo en la sección 12-7. Para esta asignatura no se requiere el conocimiento de circuitos amplificadores.

Todos los circuitos amplificadores contienen transistores que requieren voltajes de cd para establecer condiciones de operación apropiadas en la amplificación de señales de ca. Estos voltajes de cd se conocen como voltajes de polarización. Como se indica en la figura 12-62(a), un tipo común de circuito de polarización de cd utilizado en amplificadores es el divisor de voltaje formado por R_1 y R_2, el cual establece el voltaje de cd apropiado a la entrada del amplificador.

Cuando se aplica una señal de voltaje de ca al amplificador, el capacitor de acoplamiento de entrada, C_1, evita que la resistencia interna de la fuente de ca cambie el voltaje de polarización de cd. Sin el capacitor, la resistencia interna de la fuente aparecería en paralelo con R_2 y cambiaría drásticamente el valor del voltaje de cd.



▲ **FIGURA 12–62**

Un amplificador capacitivamente acoplado.

La capacitancia de acoplamiento se elige de modo que su reactancia (X_C) a la frecuencia de la señal de ca sea muy pequeña en comparación con los valores de resistor de polarización. La capacitancia de acoplamiento, por consiguiente, acopla con eficacia la señal de ca producida por la fuente a la entrada del amplificador. Del lado de la fuente del capacitor de acoplamiento de entrada sólo existe ca, pero del lado del amplificador hay ca más cd (el voltaje de la señal aparece montado sobre el voltaje de polarización de cd establecido por el divisor de voltaje), como se indica en la figura 12-62(a). El capacitor C_2 es el capacitor de acoplamiento de salida, el cual acopla la señal de ca amplificada a otra etapa del amplificador que se conectaría a la salida.

Por medio de un osciloscopio, usted revisará tres tarjetas de amplificador como la que aparece en la figura 12-62(b) en cuanto a los voltajes de entrada apropiados. Si los voltajes son incorrectos, determinará la falla más probable. En todas las mediciones, suponga que el amplificador no tiene efecto de carga de cd en el circuito de polarización del divisor de voltaje.

La tarjeta de circuito impreso y el diagrama esquemático

◆ Verifique la tarjeta de circuito impreso mostrada en la figura 12-62(b) para asegurarse de que concuerda con el diagrama esquemático del amplificador que aparece en la parte (a).

Prueba de la tarjeta 1

El sensor del osciloscopio se conecta del canal 1 a la tarjeta como se muestra en la figura 12-63. La señal de entrada producida por la fuente de voltaje sinusoidal se conecta a la tarjeta y se ajusta a una frecuencia de 5 kHz con una amplitud de 1 V rms.

◆ Determine si el voltaje y la frecuencia que aparecen en la pantalla son correctos. Si la lectura del osciloscopio es incorrecta, especifique la falla más probable en el circuito.

Prueba de la tarjeta 2

El sensor del osciloscopio se conecta del canal 1 a la tarjeta 2, como se muestra en la figura 12-63 para la tarjeta 1. La señal de entrada producida por la fuente de voltaje sinusoidal es igual a la de la tarjeta 1.

◆ Determine si la lectura que aparece en la pantalla mostrada en la figura 12-64 es correcta. Si no es correcta, especifique la falla más probable en el circuito.

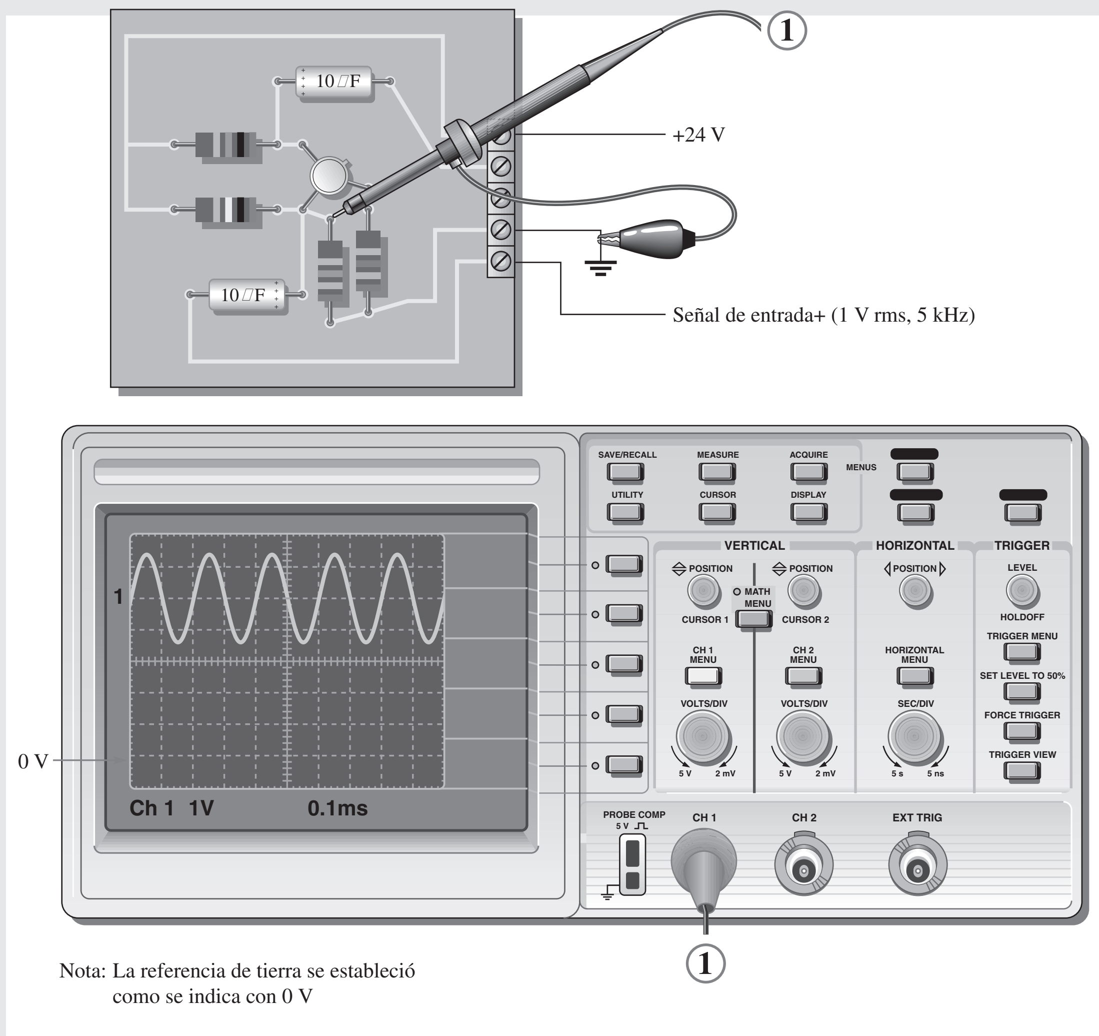
Prueba de la tarjeta 3

El sensor del osciloscopio se conecta del canal 1 a la tarjeta 3, como se muestra en la figura 12-63 para la tarjeta 1. La señal de entrada producida por la fuente de voltaje sinusoidal es la misma de antes.

◆ Determine si la medición mostrada en la pantalla de la figura 12-65 es correcta. Si la medición es incorrecta, especifique la falla más probable en el circuito.

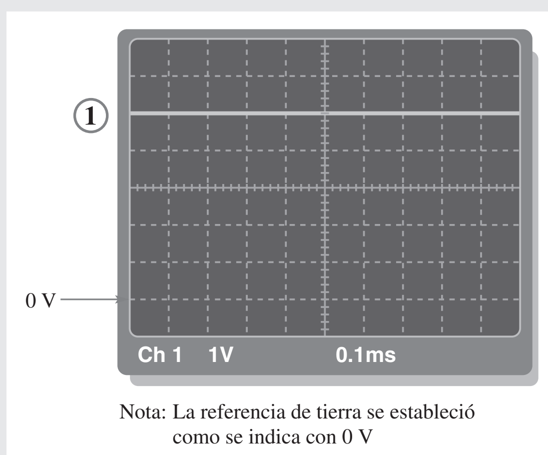
Repaso

1. Explique por qué es necesario el capacitor de acoplamiento de entrada cuando se conecta una fuente de ca al amplificador.
2. El capacitor C_2 mostrado en la figura 12-62 es un capacitor de acoplamiento de salida. En general, ¿usted qué esperaría medir en el punto del circuito designado con *C* y a la salida del circuito cuando se aplica una señal de entrada de ca al amplificador?



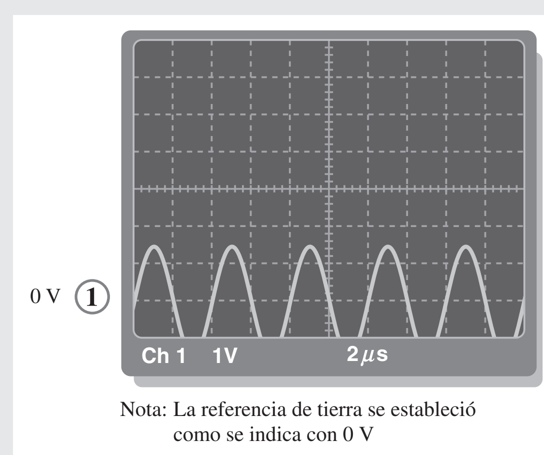
▲ **FIGURA 12–63**

Prueba de la tarjeta 1.



▲ **FIGURA 12–64**

Prueba de la tarjeta 2.



▲ **FIGURA 12–65**

Prueba de la tarjeta 3.

RESUMEN

- Un capacitor está compuesto por dos placas conductoras en paralelo separadas por un material aislante llamado *dieléctrico*.
- Un capacitor guarda energía en el campo eléctrico presente entre las placas.
- Un farad es la cantidad de capacitancia cuando se guarda un coulomb de carga con un volt entre las placas.
- La capacitancia es directamente proporcional al área de placas e inversamente proporcional a la separación entre placas.
- La constante dieléctrica es una indicación de la capacidad de un material para establecer un campo eléctrico.
- La resistencia dieléctrica es un factor que determina el voltaje de ruptura de un capacitor.
- Un capacitor bloquea la cd constante.
- La constante de tiempo para un circuito *RC* dispuesto en serie es la resistencia multiplicada por la capacitancia.
- En un circuito *RC*, al cargar o descargar un capacitor el voltaje y la corriente provocan un 63% de cambio durante cada intervalo de constante de tiempo.
- Se requieren cinco constantes de tiempo para que un capacitor se cargue o descargue por completo. Esto se llama *tiempo transitorio*.
- La carga y la descarga siguen curvas exponenciales.
- La capacitancia total en serie es menor que la del capacitor más pequeño dispuesto en serie.
- La capacitancia se suma en paralelo.
- En un capacitor, la corriente va 90° por delante del voltaje.
- La reactancia capacitiva, X_C, es inversamente proporcional a la frecuencia y la capacitancia.
- La potencia verdadera en un capacitor es de cero, es decir, no se pierde energía en un capacitor ideal a causa de la conversión en calor.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas que aparecen en el capítulo se definen en el glosario incluido al final del libro.

Capacitor Dispositivo eléctrico constituido por dos placas conductoras separadas por un material aislante y que posee la propiedad de capacitancia.

Constante de tiempo *RC* Intervalo fijo de tiempo establecido por los valores *R* y *C* que determina la respuesta de tiempo de un circuito *RC* en serie. Es igual al producto de la resistencia y la capacitancia.

Dieléctrico El material aislante colocado entre las placas de un capacitor.

Farad (F) Es la unidad de capacitancia.

Ley de Coulomb Este principio establece que existe una fuerza entre dos cuerpos cargados que es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas.

Potencia instantánea (*p*) Es el valor de la potencia que hay en un circuito en cualquier instante dado.

Potencia reactiva Q Razón a la cual un capacitor guarda y regresa energía a la fuente de modo alterno. La unidad es el VAR.

Potencia real o activa (*P*) la potencia disipada en un circuito, casi siempre en forma de calor, se mide en watts.

Reactancia capacitiva Es la oposición de un capacitor a la corriente sinusoidal. La unidad es el ohm.

VAR (volt-ampere reactivo) Es la unidad de potencia reactiva.

Voltaje de fluctuación Pequeña oscilación de voltaje provocada por la carga y descarga de un capacitor.

FÓRMULAS

12–1	$C = \frac{Q}{V}$	Capacitancia en función de carga y voltaje
12–2	$Q = CV$	Carga en función de capacitancia y voltaje

12–3	$V = \dfrac{Q}{C}$	Voltaje en función de carga y capacitancia
12–4	$W = \dfrac{1}{2}CV^2$	Energía guardada por un capacitor
12–5	$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$	Constante dieléctrica (permitividad relativa)
12–6	$C = \dfrac{A\varepsilon_r(8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m})}{d}$	Capacitancia en función de parámetros físicos
12–7	$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n$	Carga total de capacitores dispuestos en serie (general)
12–8	$\dfrac{1}{C_T} = \dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \dfrac{1}{C_3} + \cdots + \dfrac{1}{C_n}$	Recíproco de la capacitancia total en serie (general)
12–9	$C_T = \dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \dfrac{1}{C_3} + \cdots + \dfrac{1}{C_n}}$	Capacitancia total en serie (general)
12–10	$C_T = \dfrac{C_1C_2}{C_1 + C_2}$	Capacitancia total de dos capacitores dispuestos en serie
12–11	$C_T = \dfrac{C}{n}$	Capacitancia total de capacitores de igual valor dispuestos en serie.
12–12	$V_x = \left(\dfrac{C_T}{C_x}\right)V_T$	Voltaje de capacitor para capacitores en serie
12–13	$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n$	Carga total de capacitores dispuestos en paralelo (general)
12–14	$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$	Capacitancia total en paralelo (general)
12–15	$C_T = nC$	Capacitancia total en paralelo de capacitores de igual valor dispuestos en paralelo
12–16	$\tau = RC$	Constante de tiempo
12–17	$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau}$	Voltaje exponencial (general)
12–18	$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-t/\tau}$	Corriente exponencial (general)
12–19	$v = V_F(1 - e^{-t/RC})$	Voltaje exponencial creciente comenzando en cero
12–20	$v = V_i e^{-t/RC}$	Voltaje exponencial menguante que termina en cero
12–21	$t = -RC\ln\left(\dfrac{v}{V_i}\right)$	Tiempo en exponencial menguante ($V_F = 0$)
12–22	$t = -RC\ln\left(1 - \dfrac{v}{V_F}\right)$	Tiempo en exponencial creciente ($V_i = 0$)
12–23	$i = \dfrac{dq}{dt}$	Corriente instantánea empleada como derivada de la carga
12–24	$i = C\left(\dfrac{dv}{dt}\right)$	Corriente instantánea en un capacitor empleada como derivada de voltaje
12–25	$X_C = \dfrac{1}{2\pi fC}$	Reactancia capacitiva
12–26	$P_r = V_{rms}I_{rms}$	Potencia reactiva en un capacitor
12–27	$P_r = \dfrac{V_{rms}^2}{X_C}$	Potencia reactiva en un capacitor
12–28	$P_r = I_{rms}^2 X_C$	Potencia reactiva en un capacitor

12–29 $I_{1(\text{prom})} = \dfrac{C(V_1 - V_2)}{T}$ — Corriente promedio en un capacitor conmutado

12–30 $R = \dfrac{T}{C}$ — Resistencia equivalente emulada por un capacitor conmutado

12–31 $R = \dfrac{1}{fC}$ — Resistencia equivalente emulada por un capacitor conmutado

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. El o los siguientes enunciados describen con precisión un capacitor:
(a) Las placas son conductoras.
(b) El dieléctrico es una aislante entre las placas.
(c) Existe un corriente directa constante (cd) a través de un capacitor totalmente cargado.
(d) Un capacitor práctico guarda carga por tiempo indefinido cuando se desconecta de la fuente.
(e) Ninguna de las respuestas anteriores.
(f) Todas las respuestas anteriores.
(g) Únicamente las respuestas (a) y (b).

2. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero?
(a) Existe corriente a través del dieléctrico de un capacitor de carga.
(b) Cuando se conecta un capacitor a una fuente de voltaje de cd, se cargará al valor de la fuente.
(c) Un capacitor ideal puede ser descargado desconectándolo de la fuente de voltaje.

3. Una capacitancia de 1000 pF es mayor que
(a) 0.00001 F **(b)** 100,000 pF **(c)** 1000 pF **(d)** todas estas respuestas

4. Una capacitancia de 1000 pF es menor que
(a) 0.01 μF **(b)** 0.001 μF **(c)** 0.00000001 F **(d)** tanto (a) como (c)

5. Cuando el voltaje presente entre las terminales de un capacitor se incrementa, la carga almacenada
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** permanece constante **(d)** fluctúa

6. Cuando el voltaje entre las terminales de un capacitor se duplica, la carga almacenada
(a) no cambia **(b)** se reduce a la mitad **(c)** se cuadruplica **(d)** se duplica

7. El voltaje nominal de un capacitor se aumenta
(a) al incrementar la separación de las placas **(b)** al disminuir la separación de las placas
(c) al incrementar el área de placas **(d)** las respuestas (b) y (c)

8. El valor de capacitancia se incrementa
(a) al disminuir el área de placas **(b)** al incrementar la separación de las placas
(c) al disminuir la separación de las placas **(d)** al incrementar el área de placas
(e) las respuestas (a) y (b) **(f)** las respuestas (c) y (d)

9. Tres capacitores de 1 μF, 2.2 μF, y 0.047 μF se conectan en serie. La capacitancia total es menor que
(a) 1 μF **(b)** 2.2 μF **(c)** 0.047 μF **(d)** 0.001 μF

10. Cuatro capacitores de 0.022 μF se conectan en paralelo. La capacitancia total es de
(a) 0.022 μF **(b)** 0.088 μF **(c)** 0.011 μF **(d)** 0.044 μF

11. Un capacitor descargado y un resistor se conectan en serie con un interruptor y una batería de 12 V. En el instante en que se cierra el interruptor el voltaje entre las terminales del capacitor es de
(a) 12 V **(b)** 6 V **(c)** 24 V **(d)** 0 V

12. En la pregunta 11, el voltaje entre las terminales del capacitor cuando está totalmente cargado es de
(a) 12 V **(b)** 6 V **(c)** 24 V **(d)** −6 V

13. En la pregunta 11, el capacitor se cargará por completo en un tiempo igual a aproximadamente

(**a**) RC (**b**) $5RC$ (**c**) $12RC$ (**d**) no puede predecirse

14. Se aplica un voltaje sinusoidal entre las terminales de un capacitor. Cuando la frecuencia del voltaje se incrementa, la corriente

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) permanece constante (**d**) cesa

15. Un capacitor y un resistor están conectados en serie a un generador de ondas seno. La frecuencia se ajusta de modo que la reactancia capacitiva es igual a la resistencia y, por tanto, aparece una cantidad igual de voltaje entre cada componente. Si la frecuencia disminuye,

(**a**) $V_R > V_C$ (**b**) $V_C > V_R$ (**c**) $V_R = V_C$

16. Los circuitos de capacitor conmutado se utilizan para

(**a**) incrementar la capacitancia (**b**) emular inductancia

(**c**) emular resistencia (**d**) generar voltajes de onda seno

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 12-73.

1. Si los capacitores inicialmente están cargados y el interruptor se cierra, la carga en C_1

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

2. Si C_4 se pone en cortocircuito con el interruptor cerrado, la carga en C_1

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

3. Si el interruptor se cierra y C_2 se abre, la carga en C_1

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 12-74.

4. Suponga que se cierra el interruptor y se permite que C se cargue por completo. Cuando el interruptor se abre, el voltaje en C

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

5. Si C se abre cuando el interruptor se cierra, el voltaje en C

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 12-77.

6. Si el interruptor se cierra permitiendo que el capacitor se cargue y luego se abre el interruptor, el voltaje entre las terminales del capacitor

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

7. Si R_2 se abre, el tiempo requerido para que el capacitor se cargue por completo

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

8. Si R_4 se abre, el voltaje máximo al cual el capacitor puede cargarse

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

9. Si V_S se reduce, el tiempo requerido para que el capacitor se cargue por completo

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 12-80(b).

10. Si la frecuencia de la fuente de ca se incrementa, la corriente total

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

11. Si C_1 se abre, la corriente a través de C_2

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

12. Si el valor de C_2 cambia a 1 μF, la corriente a través de C_2

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles están señalados con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 12–1 El capacitor básico

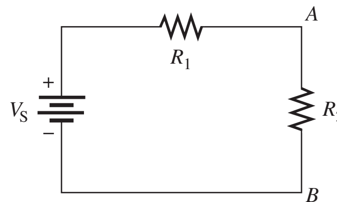
1. (a) Encuentre la capacitancia cuando $Q = 50\ \mu C$ y $V = 10$ V.
   (b) Determine la carga cuando $C = 0.001\ \mu F$ y $V = 1$ kV.
   (c) Determine el voltaje cuando $Q = 2$ mC y $C = 200\ \mu F$.
2. Transforme los siguientes valores de microfarads a picofarads:
   (a) 0.1 μF (b) 0.0025 μF (c) 4.7 μF
3. Transforme los siguientes valores de picofarads a microfarads:
   (a) 1000 pF (b) 3500 pF (c) 250 pF
4. Transforme los siguientes valores de farads a microfarads;
   (a) 0.0000001 F (b) 0.0022 F (c) 0.0000000015 F
5. ¿Cuánta energía guarda un capacitor de 1000 μF que se carga a 500 V?
6. ¿Qué tamaño de capacitor es capaz de guardar 10 mJ de energía con 100 V entre sus placas?
7. Calcule la permitividad absoluta, ε, para cada uno de los siguientes materiales. Consulte la tabla 12-3 para obtener los valores de ε_r.
   (a) aire (b) aceite (c) vidrio (d) Teflón®
8. Un capacitor de mica tiene placas cuadradas de 3.8 cm por lado con una separación entre ellas de 2.5 mils. ¿Cuál es la capacitancia?
9. Un capacitor de aire tiene un área de placas total de 0.05 m^2. La separación entre las placas es de 4.5×10^{-4} m. Calcule la capacitancia.

*10. Un estudiante desea construir un capacitor de 1 F con dos placas cuadradas para un proyecto de feria de las ciencias. Planea utilizar un dieléctrico de papel ($\varepsilon_r = 2.5$) de 8×10^{-5} m de espesor. La feria de las ciencias se va a llevar a cabo en el "Astrodomo". ¿Cabrá su capacitor en el "Astrodomo"? ¿De qué tamaño serían las placas si pudieran ser construidas?

11. Un estudiante decide construir un capacitor con dos placas conductoras de 30 cm por lado. Separa las placas con un dieléctrico de papel ($\varepsilon_r = 2.5$) de 8×10^{-5} de espesor. ¿Cuál es la capacitancia de su capacitor?
12. A temperatura ambiente (25°C), se especifica que cierto capacitor sea de 1000 pF. El capacitor tiene coeficiente de temperatura negativo de 200 ppm/°C. ¿Cuál es su capacitancia a 75°C?
13. Un capacitor de 0.001 μF tiene coeficiente de temperatura positivo de 500 ppm/°C. ¿Cuánto cambio de capacitancia provocará un incremento de 25°C en la temperatura?

SECCIÓN 12–2 Tipos de capacitores

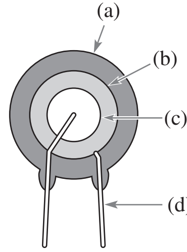
14. En la construcción de un capacitor de hojas de mica y laminillas apiladas, ¿cómo se incrementa el área de placas?
15. De mica o cerámica, ¿cuál tipo de capacitor tiene la constante dieléctrica más alta?
16. Muestre cómo conectar un capacitor electrolítico de un lado a otro de R_2 entre los puntos A y B en la figura 12-66.



▲ FIGURA 12–66

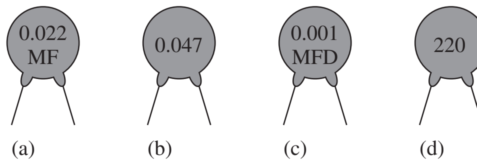
17. Nombre dos tipos de capacitores electrolíticos. ¿Cómo difieren los capacitores electrolíticos de otros capacitores?

▶ FIGURA 12–67



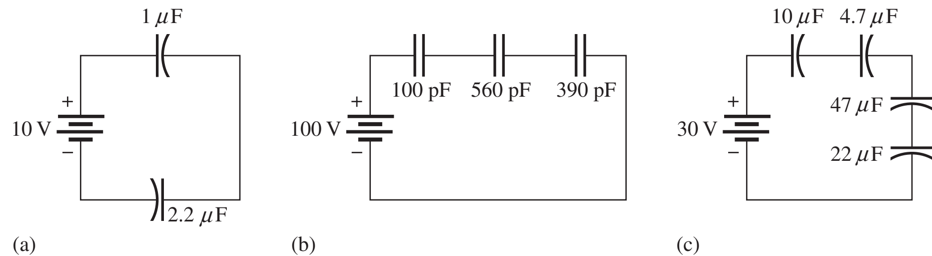
18. Identifique las partes del capacitor de disco de cerámica mostrado en la vista de corte de la figura 12-67.
19. Determine el valor de los capacitores de disco de cerámica mostrados en la figura 12-68.

▶ FIGURA 12–68



SECCIÓN 12–3 Capacitores en serie

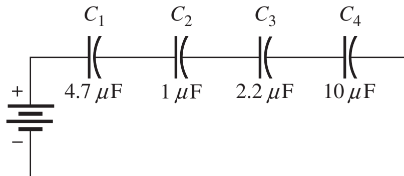
20. Cinco capacitores de 1000 pF están en serie. ¿Cuál es la capacitancia total?
21. Determine la capacitancia total para cada uno de los circuitos mostrados en la figura 12-69.
22. Para cada circuito de la figura 12-69, determine el voltaje entre las terminales de cada capacitor.



▲ FIGURA 12–69

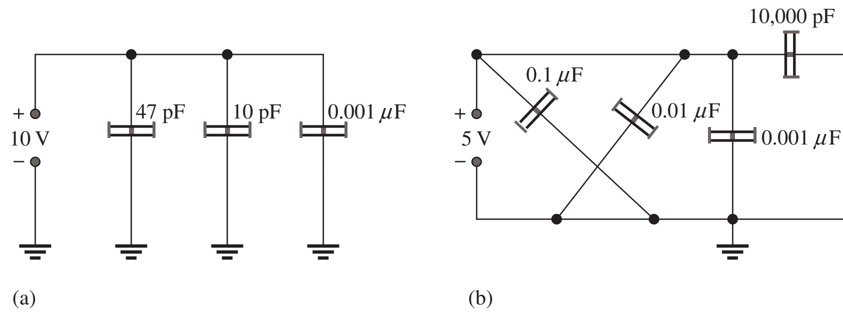
23. Dos capacitores en serie (uno de 1 μF, el otro de valor desconocido) se cargan con una fuente de 12 V. El capacitor de 1 μF se carga a 8 V y el otro a 4 V. ¿Cuál es el valor del capacitor desconocido?
24. La carga total guardada por los capacitores en serie de la figura 12-70 es de 10 μC. Determine el voltaje entre las terminales de cada capacitor.

▶ FIGURA 12–70



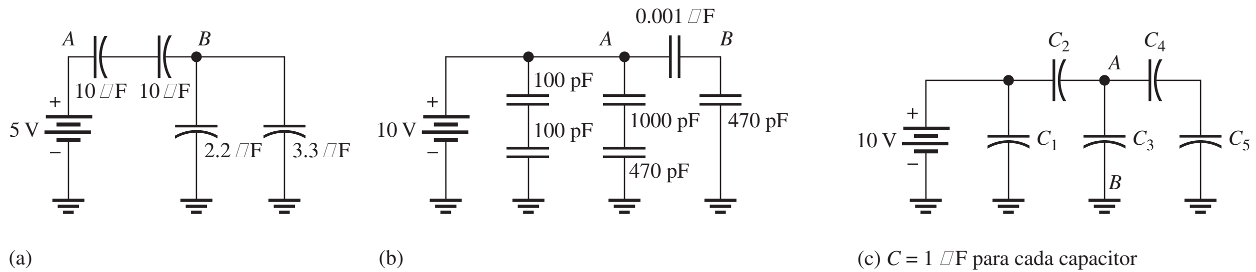
SECCIÓN 12–4 Capacitores en paralelo

25. Determine la C_T para cada circuito de la figura 12-71.
26. ¿Cuál es la carga en cada capacitor de la figura 12-71?



▲ FIGURA 12–71

27. Determine la C_T para cada circuito de la figura 12-72.



▲ FIGURA 12–72

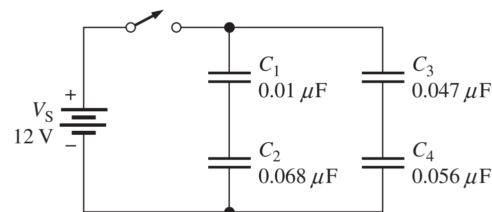
28. ¿Cuál es el voltaje entre los nodos A y B en cada circuito de la figura 12-72?

***29.** Inicialmente, los capacitores del circuito de la figura 12-73 están descargados.

(a) Después de que se cierra el interruptor, ¿cuál es la carga total suministrada por la fuente?

(b) ¿Cuál es el voltaje entre las terminales de cada capacitor?

▶ FIGURA 12–73



SECCIÓN 12–5 Capacitores en circuitos de cd

30. Determine la constante de tiempo para cada una de las combinaciones en serie:

(a) $R = 100\ \Omega, C = 1\ \mu F$ **(b)** $R = 10\ M\Omega, C = 47\ pF$

(c) $R = 4.7\ k\Omega, C = 0.0047\ \mu F$ **(d)** $R = 1.5\ M\Omega, C = 0.01\ \mu F$

31. Determine cuánto tiempo se lleva el capacitor para cargarse por completo con cada una de las combinaciones siguientes:

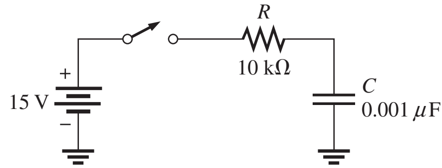
(a) $R = 56\ \Omega, C = 47\ \mu F$ **(b)** $R = 3300\ \Omega, C = 0.015\ \mu F$

(c) $R = 22\ k\Omega, C = 100\ pF$ **(d)** $R = 5.6\ M\Omega, C = 10\ pF$

32. En el circuito de la figura 12-74, inicialmente el capacitor está descargado. Determine el voltaje presente en el capacitor en los instantes posteriores al cierre del interruptor:

(a) 10 μs **(b)** 20 μs **(c)** 30 μs **(d)** 40 μs **(e)** 50 μs

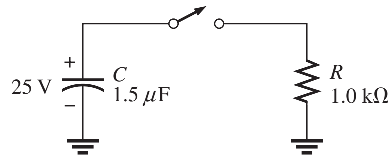
▶ **FIGURA 12–74**



33. En la figura 12-75, el capacitor se carga a 25 V. Cuando se cierra el interruptor, ¿cuál es el voltaje presente en el capacitor en los instantes posteriores?

(a) 1.5 ms **(b)** 4.5 ms **(c)** 6 ms **(d)** 7.5 ms

▶ **FIGURA 12–75**



34. Repita el problema 32 con los siguientes intervalos de tiempo:

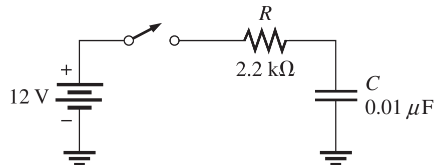
(a) 2 μs **(b)** 5 μs **(c)** 15 μs

35. Repita el problema 33 con los siguientes tiempos:

(a) 0.5 ms **(b)** 1 ms **(c)** 2 ms

***36.** Derive la fórmula para determinar el tiempo en cualquier punto de una curva de voltaje exponencial creciente. Use esta fórmula para calcular el tiempo en el cual el voltaje que aparece en la figura 12-76 llega a 6 V después de cerrar el interruptor.

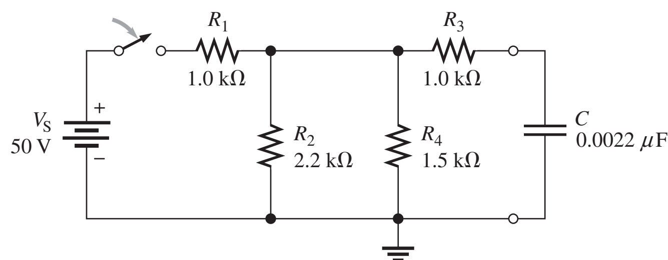
▶ **FIGURA 12–76**



37. ¿Cuánto tiempo requiere *C* para cargarse a 8 V en la figura 12-74?

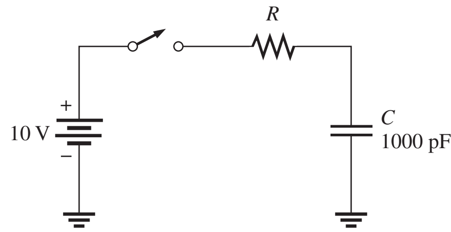
38. ¿Cuánto tiempo requiere el capacitor *C* para descargarse a 3 V en la figura 12-75?

39. Determine la constante de tiempo para el circuito de la figura 12-77.



▲ **FIGURA 12–77**

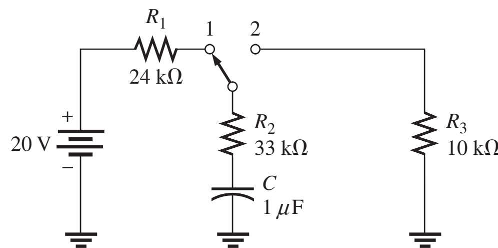
*40. En la figura 12-78, inicialmente el capacitor está descargado. En el instante $t = 10\ \mu s$ después de que se cierra el interruptor, el voltaje instantáneo en el capacitor es de 7.2 V. Determine el valor de R.



▲ FIGURA 12–78

*41. (a) El capacitor de la figura 12-79 está descargado cuando el interruptor se pone en la posición 1. El interruptor permanece en esta posición durante 10 ms y luego se cambia a la posición 2, donde se queda por tiempo indefinido. Trace la forma de onda completa del voltaje presente en el capacitor.

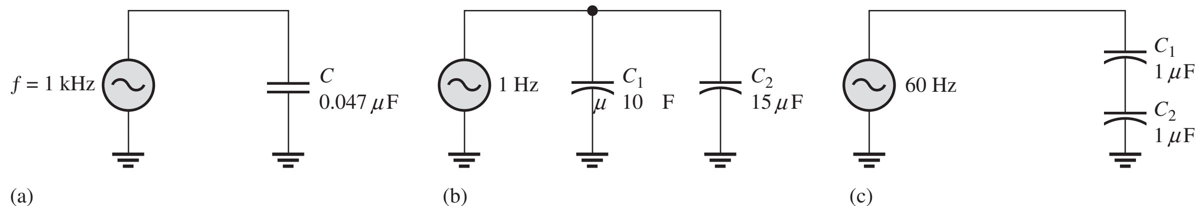
(b) Si el interruptor se pone otra vez en la posición 1 después de 5 ms en la posición 2, y luego se deja en la posición 1, ¿cómo sería la forma de onda?



▲ FIGURA 12–79

SECCIÓN 12–6 Capacitores en circuitos de ca

42. ¿Cuál es el valor de la reactancia capacitiva total en cada circuito de la figura 12-80?



▲ FIGURA 12–80

43. En la figura 12-72, cada fuente de voltaje de cd es reemplazada por una fuente de 10 V de 2 kHz. Determine la reactancia total en cada caso.

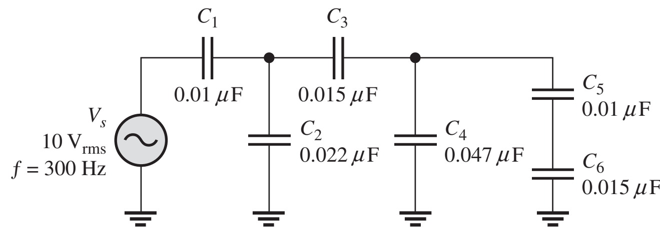
44. En cada circuito de la figura 12-80, ¿qué frecuencia se requiere para producir una X_C de 100 Ω? ¿Una X_C de 1 kΩ?

45. Un voltaje sinusoidal de 20 V rms produce una corriente rms de 100 mA cuando se conecta a cierto capacitor. ¿Cuál es la reactancia?

46. Se aplica un voltaje de 10 kHz a un capacitor de 0.0047 μF, y se mide una corriente rms de 1 mA. ¿Cuál es el valor del voltaje?

47. Determine la potencia verdadera y la potencia reactiva en el problema 46.

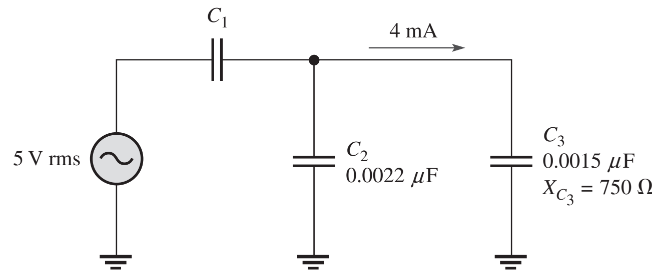
* **48.** Determine el voltaje de ca entre las terminales de cada capacitor y la corriente en cada rama del circuito de la figura 12-81.



▲ **FIGURA 12–81**

49. Determine el valor de C_1 en la figura 12-82.

* **50.** Si en la figura 12-81 C_4 se abriera, determine los voltajes que se medirían entre las terminales de los otros capacitores.



▲ **FIGURA 12–82**

SECCIÓN 12–7 Aplicaciones de los capacitores

51. Si se conecta otro capacitor en paralelo con el capacitor existente en el filtro de fuente de potencia de la figura 12-53, ¿cómo se ve afectado el voltaje de fluctuación?

52. Idealmente, ¿cuál deberá ser la reactancia de un capacitor de desvío para eliminar un voltaje de ca de 10 kHz en un punto dado en un circuito amplificador?

SECCIÓN 12–8 Circuitos de capacitor conmutado

53. En un circuito de capacitor conmutado, el capacitor tiene un valor de 2200 pF y se conmuta con una forma de onda cuyo periodo es de 10 μs. Determine el valor del resistor que se emula.

54. En un circuito de capacitor conmutado, el capacitor de 100 pF se conmuta a una frecuencia de 8 kHz. ¿Qué valor de resistor se emula?



Localización de fallas y análisis con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

55. Abra el archivo P12-55 y mida el voltaje entre las terminales de cada capacitor.

56. Abra el archivo P12-56 y mida el voltaje entre las terminales de cada capacitor.

57. Abra el archivo P12-57 y mida la corriente. Disminuya la frecuencia a la mitad y mida la corriente otra vez. Duplique la frecuencia original y de nuevo mida la corriente. Explique sus observaciones.

58. Abra el archivo P12-58 y determine qué capacitor está abierto, si hay alguno.

59. Abra el archivo P12-59 y determine qué capacitor está en cortocircuito, si hay alguno.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 12–1 El capacitor básico

1. Capacitancia es la capacidad de guardar carga.

2. **(a)** 1,000,000 μF en 1 F **(b)** 1×10^{12} pF en 1 F **(c)** 1,000,000 pF en 1 μF

3. 0.0015 μF = 1500 pF; 0.0015 μF = 0.0000000015 F

4. $W = \frac{1}{2}CV^2 = 1.125\ \mu J$

5. **(a)** C se incrementa **(b)** C disminuye.

6. (1000 V/mil) (2 mil) = 2 kV

7. $C = 2.01\ \mu F$

SECCIÓN 12–2 Tipos de capacitores

1. Los capacitores se clasifican según el material dieléctrico.

2. El valor de capacitancia de un capacitor fijo no puede ser cambiado; el valor de capacitancia de un capacitor variable sí puede ser cambiado.

3. Los capacitores electrolíticos se polarizan.

4. Cuando se conecta un capacitor polarizado, debemos asegurarnos de que el voltaje nominal es suficiente. Conecte el extremo positivo al lado positivo del circuito.

SECCIÓN 12–3 Capacitores en serie

1. La C_T en serie es menor que la C más pequeña.

2. $C_T = 61.2$ pF

3. $C_T = 0.006\ \mu F$

4. $C_T = 20$ pF

5. $V_{C1} = 75.2$ V

SECCIÓN 12–4 Capacitores en paralelo

1. Los valores de los capacitores individuales se suman en paralelo.

2. La C_T se obtiene con cinco capacitores de 0.01 μF dispuestos en paralelo.

3. $C_T = 167$ pF

SECCIÓN 12–5 Capacitores en circuitos de cd

1. $\tau = RC = 1.2\ \mu s$

2. $5\tau = 6\ \mu s$; $V_C = 4.97$ V

3. $v_{2ms} = 8.65$ V; $v_{3ms} = 9.50$ V; $v_{4ms} = 9.82$ V; $v_{5ms} = 9.93$ V

4. $v_C = 36.8$ V

SECCIÓN 12–6 Capacitores en circuitos ca

1. La corriente va 90° adelante del voltaje presente en un capacitor.

2. $X_C = 1/2\pi fC = 637\ k\Omega$

3. $f = 1/2\pi X_C C = 796$ Hz

4. $I_{rms} = 629$ mA

5. $P_{real} = 0$ W

6. $P_r = 0.453$ VAR

SECCIÓN 12–7 Aplicaciones de los capacitores

1. Una vez que el capacitor se carga al voltaje pico, se descarga muy poco antes del siguiente pico, y por tanto reduce las oscilaciones del voltaje rectificado.

2. Un capacitor de acoplamiento dejar pasar la ca de un punto a otro, pero bloquea la cd constante.
3. Un capacitor de acoplamiento debe ser lo suficientemente grande como para que su reactancia resulte insignificante a la frecuencia que ha de pasar sin oposición.
4. Un capacitor de desacoplamiento pone en cortocircuito los transitorios de voltaje de línea a tierra.
5. X_C es inversamente proporcional a la frecuencia y también lo es la capacidad del filtro de dejar pasar señales de ca.
6. Capacitancia.

SECCIÓN 12–8 Circuitos de capacitor conmutado

1. Moviendo la misma cantidad de carga correspondiente a la corriente en la resistencia equivalente.
2. Frecuencia de conmutación y valor de capacitancia.
3. Transistores.

Una aplicación de circuito

1. El capacitor de acoplamiento impide que la fuente afecte el voltaje de cd, pero deja pasar la señal de entrada.
2. En el punto *C* hay un voltaje de ca montado sobre un voltaje de cd. Un voltaje de ca sólo a la salida.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

12–1 100 kV
12–2 0.047 μF
12–3 100×10^6 pF
12–4 0.697 μF
12–5 1.54 μF
12–6 278 pF
12–7 0.011 μF
12–8 2.83 V
12–9 650 pF
12–10 0.09 μF
12–11 891 μs
12–12 8.36 V
12–13 8.13 V
12–14 ≈0.74 ms; 95 V
12–15 1.52 ms
12–16 0.42 V
12–17 3.39 kHz
12–18 $4.40\angle 90°$ mA
12–19 0 W; 1.01 mVAR
12–20 178.57 kHz

AUTOEVALUACIÓN

1. (g) **2.** (b) **3.** (c) **4.** (d) **5.** (a) **6.** (d) **7.** (a) **8.** (f)
9. (c) **10.** (b) **11.** (d) **12.** (a) **13.** (b) **14.** (a) **15.** (b) **16.** (c)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (a) **2.** (c) **3.** (c) **4.** (c) **5.** (a) **6.** (b) **7.** (a) **8.** (a)
9. (c) **10.** (a) **11.** (c) **12.** (b)

INDUCTORES

13

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Describir la construcción y las características básicas de un inductor
- Estudiar varios tipos de inductores
- Analizar inductores dispuestos en serie y en paralelo
- Analizar circuitos inductivos conmutadores de cd
- Analizar circuitos inductivos de ca
- Examinar algunas aplicaciones de los inductores

TÉRMINOS CLAVE

- Constante de tiempo *RL*
- Devanado
- Factor de calidad (*Q*)
- Henry (H)
- Inductancia
- Inductor
- Reactancia inductiva
- Voltaje inducido

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, usted determinará la inductancia de bobinas midiendo la constante de tiempo de un circuito de prueba por medio de formas de onda de un osciloscopio.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

Usted ya aprendió acerca del resistor y del capacitor. En este capítulo estudiará sobre un tercer tipo de componente pasivo básico, el *inductor*, y conocerá sus características.

Se analiza la construcción básica y las propiedades eléctricas de los inductores, así como los efectos de conectarlos en serie y en paralelo. Cómo funciona un inductor en circuitos de cd y de ca es una parte importante de esta cobertura y forma la base para estudiar circuitos reactivos en función tanto de respuesta de frecuencia como de respuesta de tiempo. También aprenderá la manera de revisar en busca de un inductor defectuoso.

El inductor, que es básicamente una bobina de alambre, se basa en el principio de inducción electromagnética, la cual se estudió en el capítulo 10. Inductancia es la propiedad de una bobina de alambre que se opone a un cambio de corriente. La base de la inductancia es el campo electromagnético que rodea cualquier conductor cuando fluye corriente a través de él. El componente eléctrico diseñado para poseer la propiedad de inductancia se llama *inductor, bobina* o, en ciertas aplicaciones, *bobina de reducción* o *reactancia*. Todos estos términos se refieren al mismo tipo de dispositivo.

13–1 EL INDUCTOR BÁSICO

Un **inductor** es un componente eléctrico pasivo formado por un alambre enrollado alrededor de un núcleo y el cual exhibe la propiedad de inductancia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir la construcción y las características básicas de un inductor**
  - Definir el término *inductancia* y enunciar su unidad
  - Analizar el concepto de voltaje inducido
  - Explicar cómo guarda energía un inductor
  - Especificar cómo afectan las características físicas a la inductancia
  - Analizar los conceptos de resistencia y capacitancia del devanado
  - Enunciar la ley de Faraday
  - Enunciar la ley de Lenz

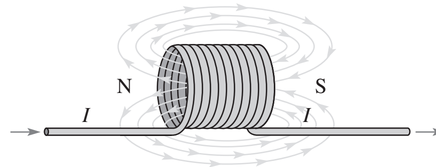
BIOGRAFÍA



Joseph Henry
1797–1878

Henry inició su carrera como profesor en una pequeña escuela de Albany, Nueva York, y más tarde llegó a ser el primer director de Smithsonian Institution. Fue el primer estadounidense, desde Franklin, en emprender experimentos científicos originales. Fue el primero en superponer bobinas de alambre enrollado en un núcleo de hierro y en observar por primera vez los efectos de la inducción electromagnética en 1830, un año antes que Faraday, pero no publicó sus hallazgos. No obstante, Henry obtuvo crédito por el descubrimiento de la autoinducción. La unidad de inductancia fue nombrada en su honor. (Crédito de la fotografía: Cortesía de Smithsonian Institution. Fotografía núm. 59,054.)

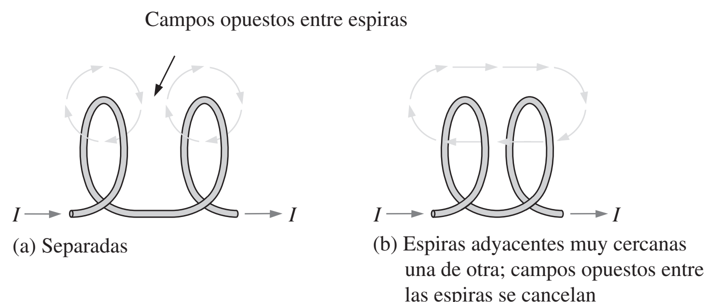
Cuando a un tramo de alambre se le da la forma de una bobina, según muestra la figura 13-1, se convierte en un inductor. Los términos *bobina* e *inductor* se utilizan indistintamente. La corriente que fluye a través de la bobina produce un campo electromagnético, como se ilustra. Las líneas de fuerza magnéticas que están presentes alrededor de cada espira (vuelta) en el **devanado** de la bobina se suman efectivamente a las líneas de fuerza localizadas alrededor de espiras adjuntas y forman un fuerte campo electromagnético adentro y en torno de la bobina. La dirección neta del campo electromagnético total crea un polo norte y un polo sur.



▶ **FIGURA 13–1**

Una bobina de alambre forma un inductor. Cuando fluye corriente a través del inductor, se crea un campo electromagnético tridimensional, el cual rodea la bobina en todas direcciones.

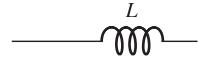
Para comprender la formación del campo electromagnético total en una bobina, consideremos la interacción de los campos electromagnéticos alrededor de dos espiras adyacentes. Cada una de las líneas de fuerza magnéticas en torno de espiras adyacentes se deflexiona hasta formar una trayectoria externa única cuando las espiras se acercan entre sí. Este efecto ocurre porque las líneas de fuerza magnéticas actúan en direcciones opuestas entre espiras adyacentes y, por consiguiente, se anulan cuando las espiras están próximas una a la otra, según ilustra la figura 13-2. El campo electromagnético total para las dos espiras se muestra en la parte (b). Este efecto es aditivo para las muchas espiras adyacentes muy cercanas entre sí en una bobina; es decir, cada espira adicio-



▲ **FIGURA 13–2**

Interacción de líneas de fuerza magnéticas en dos espiras adyacentes de una bobina.

nal contribuye a incrementar la intensidad del campo electromagnético. Por simplicidad, sólo se muestran líneas de fuerza individuales, aunque existen muchas. La figura 13-3 muestra un símbolo esquemático para un inductor.



▲ **FIGURA 13–3**

Símbolo empleado para un inductor.

Inductancia

Cuando fluye corriente a través de un inductor, se establece un campo electromagnético. Cuando cambia la corriente, el campo electromagnético también cambia. Un incremento de la corriente amplía el campo electromagnético, y una disminución de la corriente lo reduce. Por consiguiente, una corriente cambiante produce un campo electromagnético cambiante alrededor del inductor. A su vez, el campo electromagnético cambiante provoca un **voltaje inducido** a través de la bobina en una dirección que se opone al cambio de corriente. Esta propiedad se llama *autoinductancia*, pero en general se conoce simplemente como *inductancia*, simbolizada mediante L.

La inductancia es una medida de la capacidad que tiene una bobina para establecer un voltaje inducido a consecuencia de un cambio en su corriente, y que dicho voltaje inducido actúe en dirección opuesta al cambio de corriente.

La inductancia (L) de una bobina y la razón de cambio de la corriente (di/dt) determinan el voltaje inducido (v_{ind}). Un cambio de la corriente provoca que cambie el campo electromagnético, el que a su vez induce un voltaje a través de la bobina, como ya se sabe. El voltaje inducido es directamente proporcional a L y di/dt, como establece la siguiente fórmula:

$$v_{ind} = L\left(\frac{di}{dt}\right)$$ **Ecuación 13–1**

Esta fórmula indica que mientras más grande es la inductancia, mayor es el voltaje inducido. Asimismo, muestra que mientras más rápido cambia la corriente en la bobina (mayor di/dt), mayor es el voltaje inducido. Advierta la similitud de la ecuación 13-1 con la ecuación 12-24: $i = C(dv/dt)$.

La unidad de inductancia El **henry (H)** es la unidad básica de inductancia. Por definición, la inductancia de una bobina es de un henry cuando la corriente que fluye por la bobina, que cambia a razón de un ampere por segundo, induce un volt a través de la bobina. El henry es una unidad grande, por ello, en aplicaciones prácticas, los milihenries (mH) y los microhenries (μH) son las unidades más comunes.

EJEMPLO 13–1 Determine el voltaje inducido a través de un inductor de 1 henry (1 H) cuando la corriente cambia a razón de 2 A/s.

Solución

$$v_{ind} = L\left(\frac{di}{dt}\right) = (1\text{ H})(2\text{ A/s}) = \mathbf{2\text{ V}}$$

*Problema relacionado** Determine la inductancia cuando una corriente que cambia a razón de 10 A/s induce 50 V.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Almacenamiento de energía Un inductor guarda energía en el campo electromagnético creado por la corriente. La energía guardada se expresa como sigue:

$$W = \frac{1}{2}LI^2$$ **Ecuación 13–2**

Como puede advertirse, la energía guardada es proporcional a la inductancia y al cuadrado de la corriente. Cuando la corriente (I) está en amperes y la inductancia (L) en henries, la energía (W) está en joules.

Características físicas de un inductor

Los siguientes parámetros son importantes al establecer la inductancia de una bobina: la permeabilidad del material del núcleo, la cantidad de vueltas del alambre, la longitud y el área de la sección transversal del núcleo.

Material del núcleo Tal como fue planteado con anterioridad, un inductor es básicamente una bobina de alambre que rodea un material magnético o no magnético llamado **núcleo**. Ejemplos de materiales magnéticos son el hierro, el níquel, el cobalto, o aleaciones. Estos materiales tienen permeabilidades que son cientos o miles de veces más grandes que la de un vacío y se clasifican como *ferromagnéticos*. Un núcleo ferromagnético proporciona una mejor trayectoria para las líneas de fuerza magnéticas y, por tanto, permite obtener un campo magnético más intenso. Ejemplos de materiales no magnéticos son el aire, el cobre, el plástico, y el vidrio. Las permeabilidades de estos materiales son iguales a las del vacío.

Como se aprendió en el capítulo 10, la permeabilidad (μ) del material del núcleo determina la facilidad con que el campo magnético puede ser establecido, y se mide en Wb/At · m, esto es lo mismo que H/m. La inductancia es directamente proporcional a la permeabilidad del material del núcleo.

Parámetros físicos Como se indica en la figura 13-4, la cantidad de vueltas de alambre, la longitud, y el área de sección transversal del núcleo son factores a considerar al momento de establecer el valor de inductancia. La inductancia es inversamente proporcional a la longitud del núcleo y directamente proporcional al área de la sección transversal. Asimismo, la inductancia está directamente relacionada con la cantidad de vueltas de alambre elevada al cuadrado. Esta relación es como sigue:

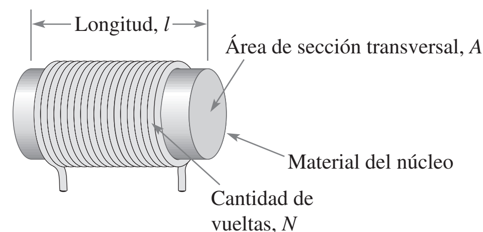
Ecuación 13–3

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

donde L es la inductancia en henries (H), N la cantidad de vueltas de alambre, μ la permeabilidad en henries por metro (H/m), A el área de la sección transversal en metros al cuadrado, e l es la longitud del núcleo en metros (m).

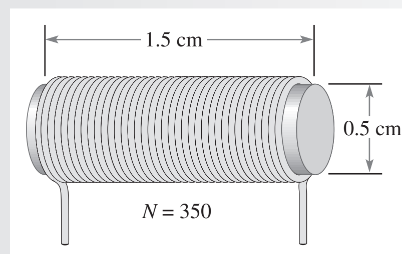
▶ **FIGURA 13–4**

Parámetros físicos de un inductor.



EJEMPLO 13–2 Determine la inductancia de la bobina mostrada en la figura 13-5. La permeabilidad del núcleo es de 0.25×10^{-3} H/m.

▶ **FIGURA 13–5**



Solución Primero determine la longitud y el área en metros.

$$l = 1.5 \text{ cm} = 0.015 \text{ m}$$
$$A = \pi r^2 = \pi(0.25 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

La inductancia de la bobina es

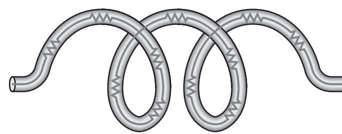
$$L = \frac{N^2\mu A}{l} = \frac{(350)^2(0.25 \times 10^{-3}\text{ H/m})(1.96 \times 10^{-5}\text{ m}^2)}{0.015\text{ m}} = \mathbf{40\ mH}$$

Problema relacionado Determine la inductancia de una bobina con 90 vueltas alrededor de un núcleo de 1.0 cm de largo y 0.8 cm de diámetro. La permeabilidad es de 0.25×10^{-3} H/m.

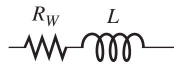
Resistencia de devanado

Cuando se elabora una bobina a partir de cierto material, por ejemplo, alambre de cobre aislado, éste tiene cierta resistencia por unidad de longitud. Al utilizar muchas vueltas de alambre para construir una bobina, la resistencia total puede resultar significativa. Esta resistencia inherente se llama *resistencia de cd* o *resistencia de devanado* (R_W).

Aunque esta resistencia se distribuye a lo largo del alambre, aparece efectivamente en serie con la inductancia de la bobina, según muestra la figura 13-6. En muchas aplicaciones, la resistencia de devanado puede ser lo suficientemente pequeña como para ser ignorada y entonces la bobina se considera un inductor ideal. En otros casos, la resistencia debe ser considerada.



(a) El alambre tiene resistencia distribuida a todo lo largo



(b) Circuito equivalente

▲ **FIGURA 13–6**

Resistencia de devanado de una bobina.

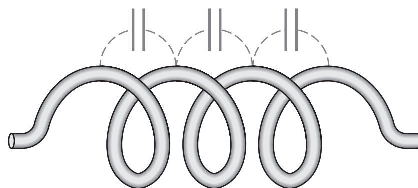
Capacitancia de devanado

Al colocar dos conductores uno al lado del otro, siempre existe algo de capacitancia entre ellos. Por tanto, cuando se colocan muchas vueltas de alambre muy cerca una de otra en una bobina, cierta cantidad de capacitancia parásita, llamada *capacitancia de devanado* (C_W), es un efecto colateral natural. En muchas aplicaciones, esta capacitancia de devanado es muy pequeña y su efecto resulta insignificante. En otros casos, en particular a altas frecuencias, puede llegar a ser muy importante.

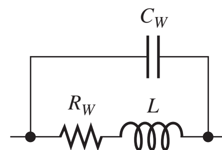
El circuito equivalente a un inductor, con su resistencia de devanado (R_W) y su capacitancia de devanado (C_W), se muestra en la figura 13-7. La capacitancia actúa efectivamente en paralelo. El total de las capacitancias parásitas entre cada espira del devanado se indica en un esquema como una capacitancia que aparece en paralelo con la bobina y su resistencia de devanado, como ilustra la figura 13-7(b).

NOTA DE SEGURIDAD

Sea cuidadoso cuando trabaje con inductores porque se pueden desarrollar altos voltajes inducidos debido a un campo magnético rápidamente cambiante. Esto ocurre cuando se interrumpe la corriente o si su valor cambia abruptamente.



(a) La capacitancia parásita entre cada espira aparece como una capacitancia total en paralelo (C_W)



(b) Circuito equivalente

▲ **FIGURA 13–7**

Capacitancia de devanado de una bobina.

BIOGRAFÍA



Heinrich F. E. Lenz 1804–1865

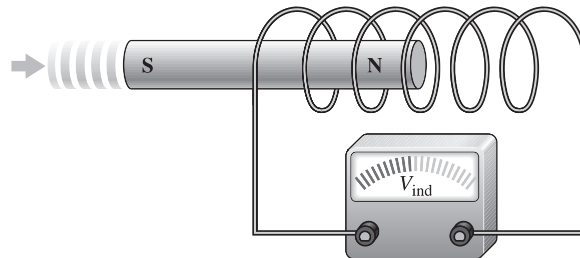
Lenz nació en Estonia (entonces Rusia) y llegó a ser profesor en University of St. Petersburg. Realizó muchos experimentos siguiendo el curso de acción de Faraday y formuló el principio del electromagnetismo, el cual define la polaridad del voltaje inducido en una bobina. El enunciado de este principio fue nombrado en su honor. (Crédito de la fotografía: AIP Emilio Segrè Visual Archives, E. Scott Barr Collection.)

Repaso de la ley de Faraday

La ley de Faraday se introdujo en el capítulo 10 y se revisa aquí por la importancia que tiene en el estudio de los inductores. Michael Faraday descubrió el principio de inducción electromagnética en 1831. Encontró que al mover un imán a través de una bobina de alambre se inducía cierto voltaje en la bobina, y que cuando se proporcionaba una trayectoria completa el voltaje inducido provocaba una corriente inducida. Faraday observó que

La cantidad de voltaje inducido en una bobina es directamente proporcional a la razón de cambio del campo magnético con respecto a la bobina.

Este principio se ilustra en la figura 13-8, donde una barra imanada se mueve al través de una bobina de alambre. El voltímetro conectado entre las terminales de la bobina registra un voltaje inducido. Mientras más rápido se mueve el imán, el voltaje inducido es mayor.



▶ FIGURA 13–8

Voltaje inducido creado por un campo magnético cambiante.

Cuando un alambre forma una bobina a partir de cierta cantidad de espiras o vueltas y éstas se exponen a un campo magnético cambiante, se induce un voltaje en la bobina. El voltaje inducido es proporcional a la cantidad de vueltas de alambre localizadas en la bobina, N, y a la razón a la cual cambia el campo magnético. La razón de cambio del campo magnético se designa mediante $d\phi/dt$, donde ϕ es el flujo magnético. La relación $d\phi/dt$ se expresa en webers/segundo (Wb/s). La ley de Faraday establece que el voltaje inducido a través de una bobina es igual a la cantidad de vueltas (espiras) multiplicada por la razón de cambio del flujo, y se expresa en forma concisa como sigue:

Ecuación 13–4

$$v_{ind} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$$

EJEMPLO 13–3 Aplique la ley de Faraday para determinar el voltaje inducido a través de una bobina con 500 vueltas localizada en un campo magnético que cambia a razón de 5 Wb/s.

Solución

$$v_{ind} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right) = (500\text{ t})(5\text{ Wb/s}) = \mathbf{2.5\ kV}$$

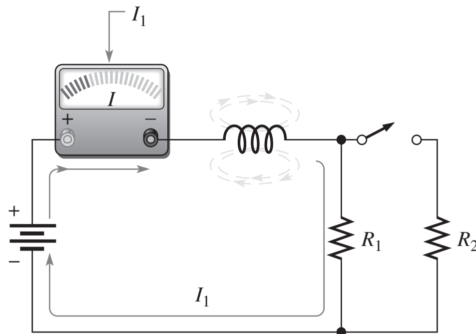
Problema relacionado Una bobina de 1000 vueltas tiene un voltaje inducido de 500 V a través de ella. ¿Cuál es la razón de cambio del campo magnético?

Ley de Lenz

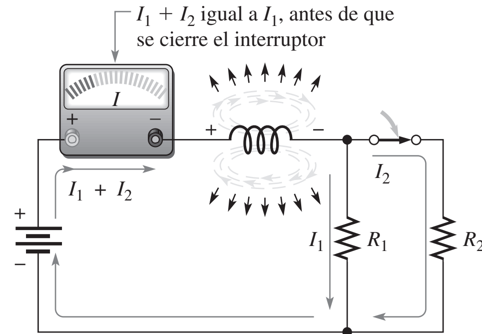
La **ley de Lenz** se introdujo en capítulo 10 y se enuncia nuevamente aquí.

Cuando la corriente que pasa a través de una bobina cambia, se crea un voltaje inducido a consecuencia del campo electromagnético cambiante y la polaridad del voltaje inducido es tal que siempre se opone al cambio de corriente.

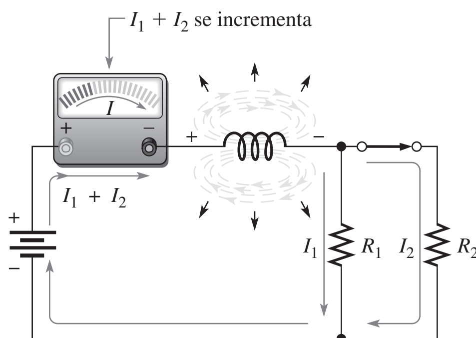
La figura 13-9 ilustra la ley de Lenz. En la parte (a), la corriente es constante y está limitada por R_1. No existe un voltaje inducido porque el campo electromagnético no cambia. En la parte (b), el



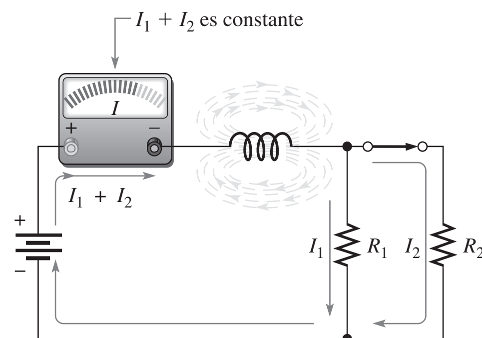
(a) Interruptor abierto: corriente constante y campo magnético constante; no se induce voltaje.



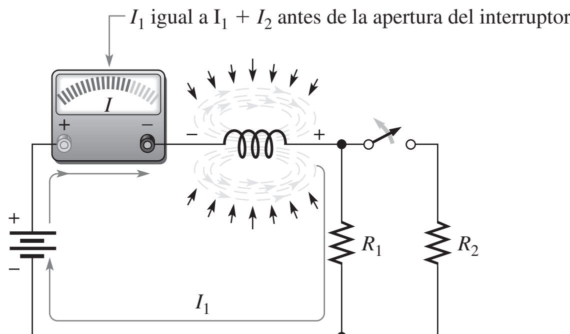
(b) En el instante en que se cierra el interruptor: el campo magnético en expansión induce voltaje, el cual se opone al incremento de la corriente total. La corriente total permanece igual en ese momento.



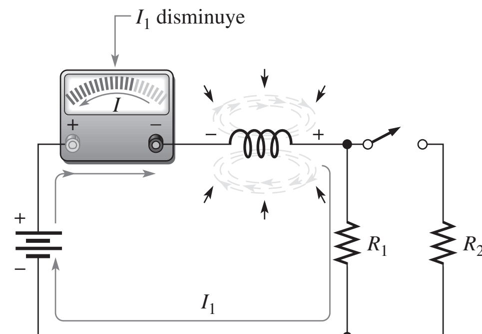
(c) Exactamente después del cierre del interruptor: la rapidez de expansión del campo magnético disminuye, lo cual permite que la corriente se incremente de modo exponencial a medida que disminuye el voltaje inducido.



(d) El interruptor permanece cerrado: la corriente y el campo magnético alcanzan un valor constante.



(e) En el instante en que se abre el interruptor: el campo magnético empieza a colapsarse, y se crea un voltaje inducido que se opone a la disminución de la corriente.



(f) Después de que se abre el interruptor: la rapidez de colapso del campo magnético disminuye, lo cual permite a la corriente disminuir de modo exponencial de regreso a su valor original.

▲ **FIGURA 13–9**

Demostración de la ley de Lenz en un circuito inductivo: cuando la corriente trata de cambiar de modo repentino, el campo electromagnético cambia e induce un voltaje en una dirección que se opone a ese cambio de corriente.

interruptor se cierra de repente y coloca a R_2 en paralelo con R_1, y por tanto se reduce la resistencia. Naturalmente, la corriente trata de incrementarse y el campo electromagnético empieza a ampliarse, pero el voltaje inducido se opone a este intento de incremento de corriente durante un instante.

En la figura 13-9(c), el voltaje inducido disminuye gradualmente y permite que la corriente se incremente. En la parte (d), la corriente ha alcanzado un valor constante determinado por los resistores en paralelo, y el voltaje inducido es de cero. En la parte (e), el interruptor se abrió de

repente y, por un instante, el voltaje inducido no permite que disminuya la corriente, entonces se forma un arco eléctrico entre los contactos del interruptor. En la parte (f), el voltaje inducido disminuye gradualmente y permite que la corriente disminuya a un valor determinado mediante R_1. Advierta que la polaridad del voltaje inducido se opone a cualquier cambio de corriente. La polaridad del voltaje inducido se opone al voltaje de la batería si hay un incremento de corriente, y auxilia al voltaje de la batería en el caso de una disminución de corriente.

REPASO DE LA SECCIÓN 13-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Enumere los parámetros que contribuyen a la inductancia de una bobina.
2. La corriente a través de un inductor de 15 mH cambia a razón de 500 mA/s. ¿Cuál es el voltaje inducido?
3. Describa qué le sucede a *L* cuando
   (a) *N* se incrementa
   (b) La longitud del núcleo se incrementa
   (c) El área de sección transversal del núcleo disminuye
   (d) Un núcleo ferromagnético es reemplazado por un núcleo de aire
4. Explique por qué los inductores tienen algo de resistencia de devanado.
5. Explique por qué los inductores tienen algo de capacitancia de devanado.

13–2 TIPOS DE INDUCTORES

Los inductores normalmente se clasifican de acuerdo con el tipo de material del núcleo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar varios tipos de inductores**
  - Describir los tipos básicos de inductores fijos
  - Distinguir entre inductores fijos y variables

Los inductores son elaborados en una diversidad de formas y tamaños. Básicamente, caen dentro de dos categorías generales: fijos y variables. Sus símbolos esquemáticos estándar se muestran en la figura 13-10.

Tanto los inductores fijos como los variables se clasifican de acuerdo con el tipo de material de su núcleo. Tres tipos comunes son el núcleo de aire, el núcleo de hierro, y el núcleo de ferrita. Cada uno tiene un símbolo único, como se muestra en la figura 13-11.

Los inductores ajustables (variables) disponen, en general, de un ajuste tipo tornillo que mueve un núcleo deslizante hacia dentro y hacia fuera y, por tanto, cambia la inductancia. Existe una amplia variedad de inductores y algunos se muestran en la figura 13-12. Los inductores fijos pequeños se encapsulan con frecuencia en un material aislante que protege el fino alambre de la bobina. Los inductores encapsulados tienen una apariencia similar a un resistor.

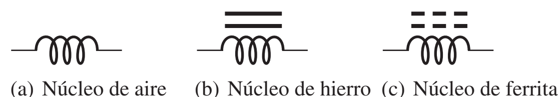
▶ FIGURA 13–10

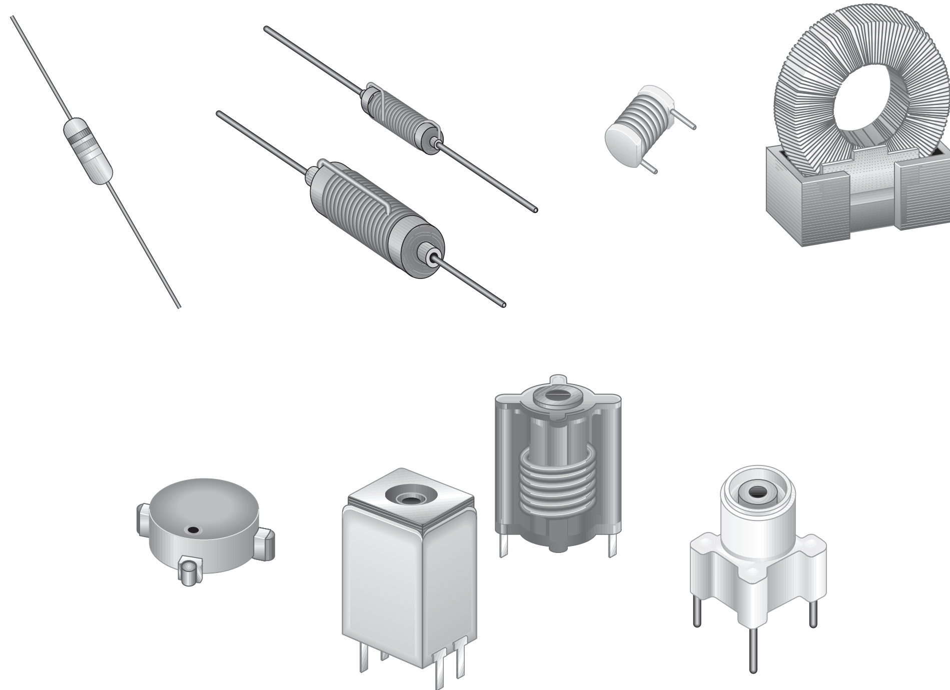
Símbolos empleados para inductores fijos y variables.



▶ FIGURA 13–11

Símbolos de inductor.





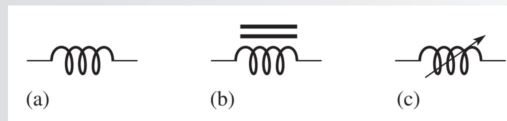
◀ **FIGURA 13–12**

Inductores típicos.

REPASO DE LA SECCIÓN 13-2

1. Nombre dos categorías generales de inductores.
2. Identifique los símbolos de inductor que aparecen en la figura 13-13.

▶ **FIGURA 13–13**



13–3 INDUCTORES EN SERIE Y EN PARALELO

Cuando se conectan inductores en serie, la inductancia total aumenta. Cuando se conectan en paralelo, la inductancia total disminuye.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar inductores dispuestos en serie y en paralelo**
  - Determinar la inductancia total en serie
  - Determinar la inductancia total en paralelo

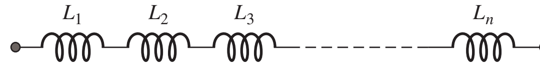
Inductancia total en serie

Cuando se conectan inductores en serie, como en la figura 13-14, la inductancia total, L_T, es la suma de las inductancias individuales. La fórmula para L_T se expresa en la siguiente ecuación para el caso general de n inductores en serie:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n$$ **Ecuación 13–5**

▶ FIGURA 13–14

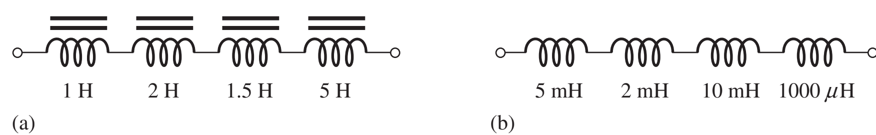
Inductores en serie.



Observe que el cálculo de la inductancia total en serie es análogo al cálculo de la resistencia total en serie (capítulo 5) y al de la capacitancia total en paralelo (capítulo 12).

EJEMPLO 13–4 Determine la inductancia total en cada una de las conexiones en serie de la figura 13-15.

▶ FIGURA 13–15



Solución En la figura 13-15(a),

$$L_T = 1\text{ H} + 2\text{ H} + 1.5\text{ H} + 5\text{ H} = \mathbf{9.5\text{ H}}$$

En la figura 13-15(b),

$$L_T = 5\text{ mH} + 2\text{ mH} + 10\text{ mH} + 1\text{ mH} = \mathbf{18\text{ mH}}$$

Nota: $1000\ \mu\text{H} = 1\text{ mH}$

Problema relacionado ¿Cuál es la inductancia total de tres inductores de 50 μH dispuestos en serie?

Inductancia total en paralelo

Cuando se conectan inductores en paralelo, como en la figura 13-16, la inductancia total es menor que la inductancia más pequeña. La fórmula general establece que el recíproco de la inductancia total es igual a la suma de los recíprocos de las inductancias individuales.

Ecuación 13–6

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \frac{1}{L_n}$$

Se puede calcular la inductancia total, L_T, tomando el recíproco de ambos miembros de la ecuación 13-6.

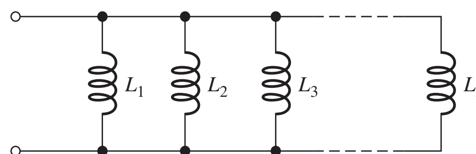
Ecuación 13–7

$$L_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}\right) + \left(\frac{1}{L_2}\right) + \left(\frac{1}{L_3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{L_n}\right)}$$

El cálculo de la inductancia total en paralelo es análogo al cálculo de la resistencia total en paralelo (capítulo 6) y al de la capacitancia total en serie (capítulo 12). Para la combinación en serie-paralelo de inductores, la inductancia total se determina igual que la resistencia total en circuitos resistivos.

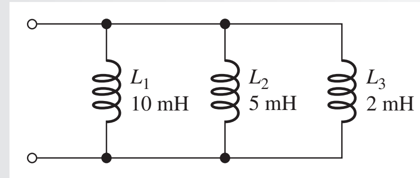
▶ FIGURA 13–16

Inductores en paralelo.



EJEMPLO 13–5 Determine la L_T en la figura 13-17.

▶ **FIGURA 13–17**



Solución Use la ecuación 13-7 para determinar la inductancia total.

$$L_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}\right) + \left(\frac{1}{L_2}\right) + \left(\frac{1}{L_3}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{10\text{ mH}} + \frac{1}{5\text{ mH}} + \frac{1}{2\text{ mH}}} = \mathbf{1.25\ mH}$$

Problema relacionado Determine la L_T para una conexión en paralelo de 50 μH, 80 μH, 100 μH, y 150 μH.

REPASO DE LA SECCIÓN 13-3

1. Enuncie la regla aplicada para combinar inductores en serie.
2. ¿Cuál es la L_T para una conexión dispuesta en serie de 100 μH, 500 μH, y 2 mH?
3. Se conectan en serie cinco bobinas de 100 mH. ¿Cuál es la inductancia total?
4. Compare la inductancia total en paralelo con el inductor individual de valor más pequeño.
5. El cálculo de la inductancia total en paralelo es análogo al de la resistencia total en paralelo. (V o F)
6. Determine la L_T para cada una de las combinaciones en paralelo de:
   (a) 40 μH y 60 μH
   (b) 100 mH, 50 mH y 10 mH

13–4 INDUCTORES EN CIRCUITOS DE CD

El campo electromagnético de un inductor guarda energía cuando se conecta a una fuente de voltaje de cd. La acumulación de corriente a través del inductor ocurre de una forma predecible, la cual depende de la constante de tiempo determinada por la inductancia y la resistencia presentes en un circuito.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

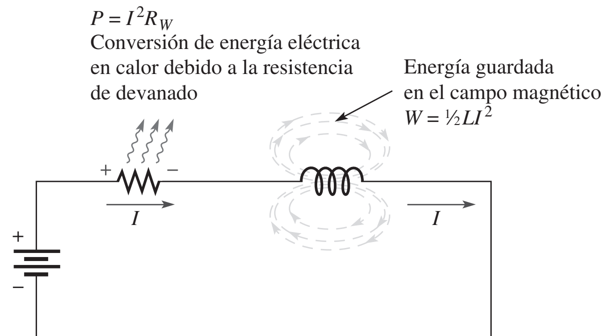
- **Analizar circuitos inductivos de cd conmutados**
  - Describir el incremento y la disminución de corriente en un inductor
  - Definir el término *constante de tiempo RL*
  - Describir voltaje inducido
  - Escribir las ecuaciones exponenciales de corriente en un inductor

Cuando por un inductor fluye corriente directa constante, no hay voltaje inducido. Hay, sin embargo, una caída de voltaje provocada por la resistencia de devanado de la bobina. La inductancia aparece como un corto ante corriente directa. En el campo electromagnético se almacena

energía de acuerdo con la fórmula previamente establecida en la ecuación 13-2, $W = \frac{1}{2}LI^2$. La única conversión de energía en calor ocurre en la resistencia de devanado $P = I^2R_W$. Esta condición se ilustra en la figura 13-18.

▶ **FIGURA 13–18**

Almacenamiento y conversión de energía en calor en un inductor de un circuito de cd.



La constante de tiempo *RL*

Como la acción básica del inductor es desarrollar un voltaje que se oponga a un cambio de su corriente, se deduce que la corriente no puede cambiar de modo instantáneo en un inductor. Es necesario que transcurra cierto tiempo para que la corriente cambie de un valor a otro. La constante de tiempo *RL* determina la rapidez a la cual cambia la corriente.

> **La constante de tiempo *RL* es un intervalo fijo igual a la razón de la inductancia a la resistencia.**

La fórmula es

Ecuación 13–8

$$\tau = \frac{L}{R}$$

donde τ está en segundos cuando la inductancia (L) está en ohms.

EJEMPLO 13–6 La resistencia de un circuito *RL* en serie es de 1.0 kΩ y su inductancia es de 1 mH. ¿Cuál es la constante de tiempo?

Solución

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1\text{ mH}}{1.0\text{ k}\Omega} = \frac{1 \times 10^{-3}\text{ H}}{1 \times 10^{3}\ \Omega} = 1 \times 10^{-6}\text{ s} = \mathbf{1\ \mu s}$$

Problema relacionado Determine la constante de tiempo con $R = 2.2$ kΩ y $L = 500$ μH.

Corriente en un inductor

Corriente creciente En un circuito *RL* en serie, la corriente se incrementará hasta aproximadamente un 63% de su valor total en un intervalo de constante de tiempo una vez que se aplica el voltaje. Esta acumulación de corriente es análoga a la acumulación de voltaje en un capacitor durante la carga en un circuito *RC*; ambas siguen una curva exponencial y alcanzan porcentajes aproximados de la corriente final como se indica en la tabla 13-1 y en la figura 13-19.

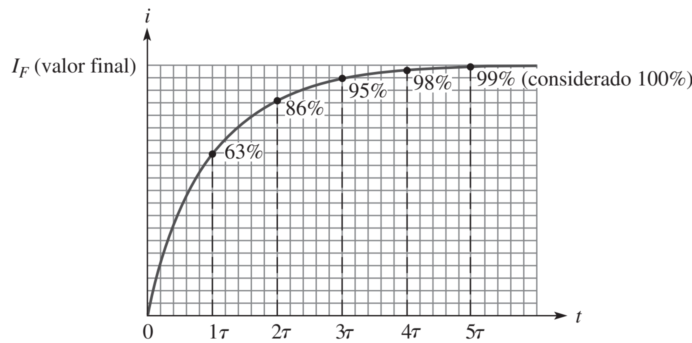
El cambio de corriente durante cinco intervalos de constante de tiempo se ilustra en la figura 13-20. Cuando la corriente alcanza su valor final en 5τ, deja de cambiar. En ese momento, el inductor actúa como un cortocircuito (excepto por la resistencia de devanado) con una corriente constante. El valor final de la corriente es

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{10\text{ V}}{1.0\text{ k}\Omega} = 10\text{ mA}$$

NÚMERO DE CONSTANTES DE TIEMPO	PORCENTAJE APROXIMADO DE LA CORRIENTE FINAL
1	63
2	86
3	95
4	98
5	99 (considerado 100%)

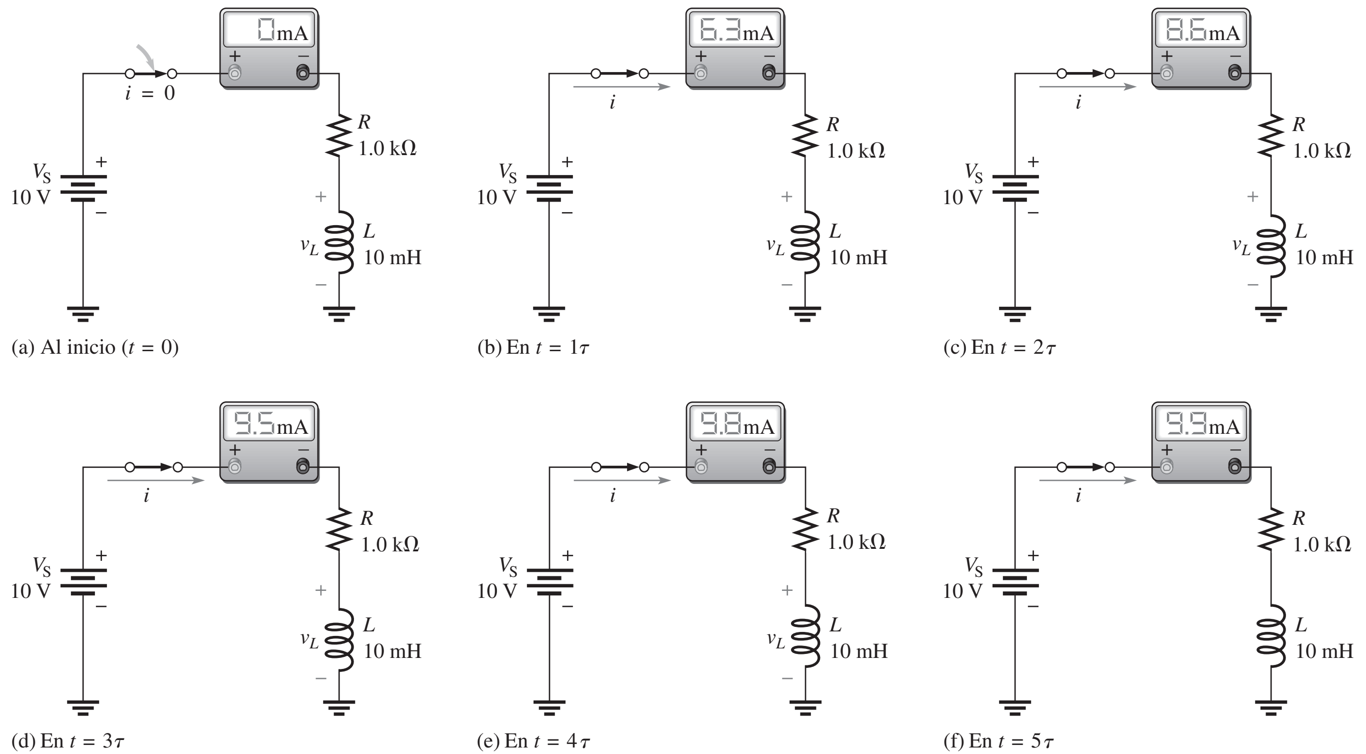
◀ **TABLA 13–1**

Porcentaje de la corriente final después de cada intervalo de constante de tiempo durante el incremento de la corriente.



▲ **FIGURA 13–19**

Corriente creciente en un inductor.

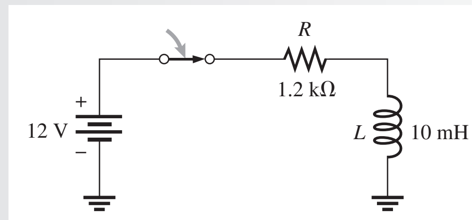


▲ **FIGURA 13–20**

Ilustración del aumento exponencial de corriente en un inductor. La corriente se incrementa en aproximadamente un 63% durante cada intervalo de constante de tiempo después de que se cierra el interruptor. En la bobina se induce un voltaje (v_L) que tiende a oponerse al incremento de la corriente.

EJEMPLO 13–7 Encuentre la constante de tiempo para la figura 13-21. Determine entonces la corriente y el tiempo en cada intervalo de constante de tiempo, medida en el instante en que se cierra el interruptor.

▶ **FIGURA 13–21**



Solución La constante de tiempo es

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{10\text{ mH}}{1.2\text{ k}\Omega} = \mathbf{8.33\ \mu s}$$

La corriente en cada constante de tiempo es un porcentaje de la corriente final. La corriente final es

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{12\text{ V}}{1.2\text{ k}\Omega} = 10\text{ mA}$$

Al aplicar los valores de porcentaje de constante de tiempo de la tabla 13-1,

$$\text{En } 1\tau\text{: } i = 0.63(10\text{ mA}) = \mathbf{6.3\ mA};\ t = \mathbf{8.33\ \mu s}$$
$$\text{En } 2\tau\text{: } i = 0.86(10\text{ mA}) = \mathbf{8.6\ mA};\ t = \mathbf{16.7\ \mu s}$$
$$\text{En } 3\tau\text{: } i = 0.95(10\text{ mA}) = \mathbf{9.5\ mA};\ t = \mathbf{25.0\ \mu s}$$
$$\text{En } 4\tau\text{: } i = 0.98(10\text{ mA}) = \mathbf{9.8\ mA};\ t = \mathbf{33.3\ \mu s}$$
$$\text{En } 5\tau\text{: } i = 0.99(10\text{ mA}) = 9.9\text{ mA} \cong \mathbf{10\ mA};\ t = \mathbf{41.7\ \mu s}$$

Problema relacionado Repita los cálculos si R es de 680 Ω y L de 100 μH.



Use el archivo Multisim E13-07 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado. Utilice una onda cuadrada para reemplazar la fuente de voltaje de cd y el interruptor.

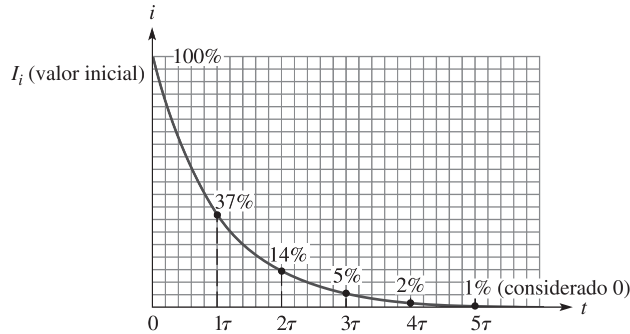
Corriente menguante En un inductor, la corriente disminuye de modo exponencial de acuerdo con los valores en porcentaje aproximados que aparecen en la tabla 13-2 y en la figura 13-22.

El cambio de la corriente durante cinco intervalos de constante de tiempo se ilustra en la figura 13-23. Cuando la corriente alcanza su valor final de aproximadamente 0 A, deja de cambiar.

▶ **TABLA 13–2**

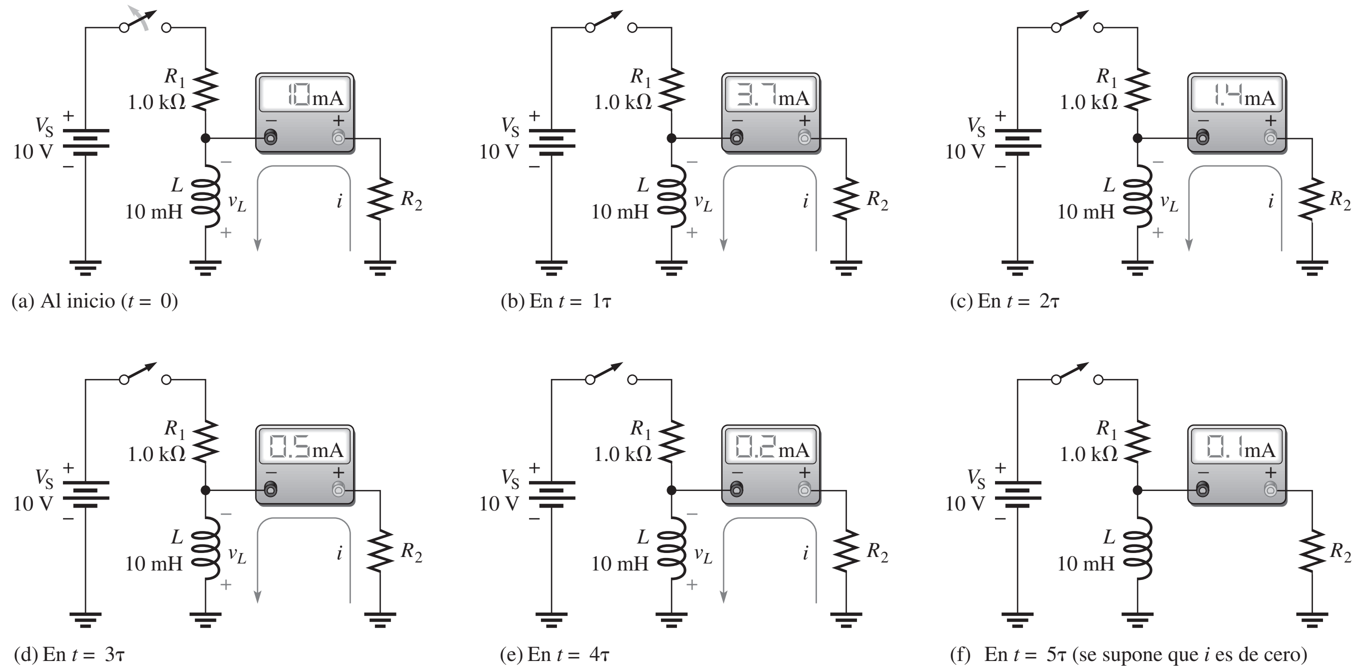
Porcentaje de la corriente inicial después de cada intervalo de constante de tiempo mientras la corriente está disminuyendo.

NÚMERO DE CONSTANTES DE TIEMPO	PORCENTAJE APROXIMADO DE LA CORRIENTE FINAL
1	37
2	14
3	5
4	2
5	1 (considerado 0)



▲ **FIGURA 13–22**

Corriente menguante en un inductor.



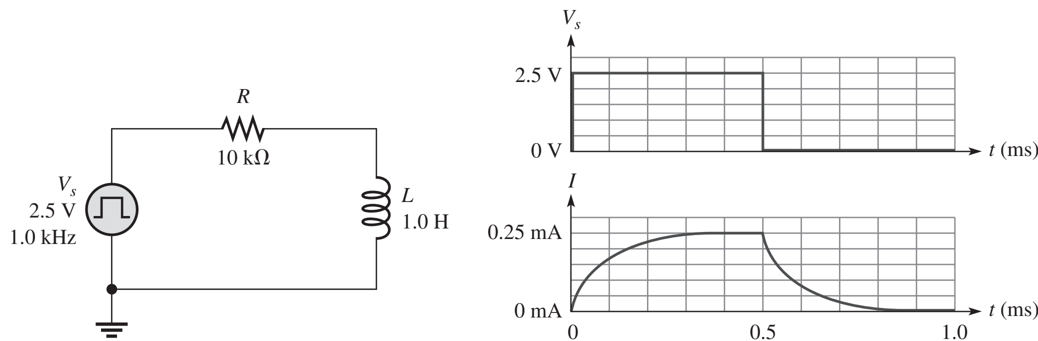
▲ **FIGURA 13–23**

Ilustración de la disminución exponencial de la corriente en un inductor. La corriente disminuye en aproximadamente un 63% durante cada intervalo de constante de tiempo después de que se abre el interruptor. En la bobina se induce un voltaje (v_L) que tiende a oponerse a la disminución de la corriente.

Antes de que se abra el interruptor, la corriente que fluye a través de L se mantiene a un valor constante de 10 mA, el cual es determinado por R_1 porque L actúa idealmente como un cortocircuito. Cuando se abre el interruptor, el voltaje inducido por el inductor proporciona inicialmente 10 mA a través de R_2. La corriente disminuye entonces en un 63% durante cada intervalo de constante de tiempo.

Una buena forma de demostrar tanto la corriente creciente como la menguante en un circuito *RL* es utilizar un voltaje de onda cuadrada como entrada. La onda cuadrada es una señal útil para observar la respuesta de un circuito a la corriente directa porque genera automáticamente una acción de encendido y apagado similar a un interruptor. (La respuesta de tiempo se tratará en el capítulo 20.) Cuando la onda cuadrada pasa de su nivel bajo a su nivel alto, la corriente que circula en el

circuito responde exponencialmente y se incrementa a su valor final. Cuando la onda cuadrada regresa al nivel de cero, la corriente en el circuito responde disminuyendo en forma exponencial a su valor de cero. La figura 13-24 muestra formas de onda de corriente y de voltaje de entrada.



▲ FIGURA 13–24

EJEMPLO 13–8 Para el circuito de la figura 13-24, ¿cuál es la corriente en 0.1 ms y 0.6 ms?

Solución La constante de tiempo *RL* para el circuito es

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1.0\text{ H}}{10\text{ k}\Omega} = 0.1\text{ ms}$$

Si el periodo del generador de ondas cuadradas es lo suficientemente largo como para que la corriente alcance su valor máximo en 5τ, la corriente se incrementará exponencialmente y durante cada intervalo de constante de tiempo tendrá un valor igual al porcentaje de corriente final dado en la tabla 13-1. La corriente final es

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{2.5\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 0.25\text{ mA}$$

La corriente en 0.1 ms es

$$i = 0.63(0.25\text{ mA}) = \mathbf{0.158\text{ mA}}$$

En 0.6 ms, la entrada de onda cuadrada ha estado en el nivel de 0 V durante 0.1 ms, o 1τ; y la corriente disminuye desde su valor máximo hacia su valor final de 0 mA en un 63 por ciento. Luego entonces,

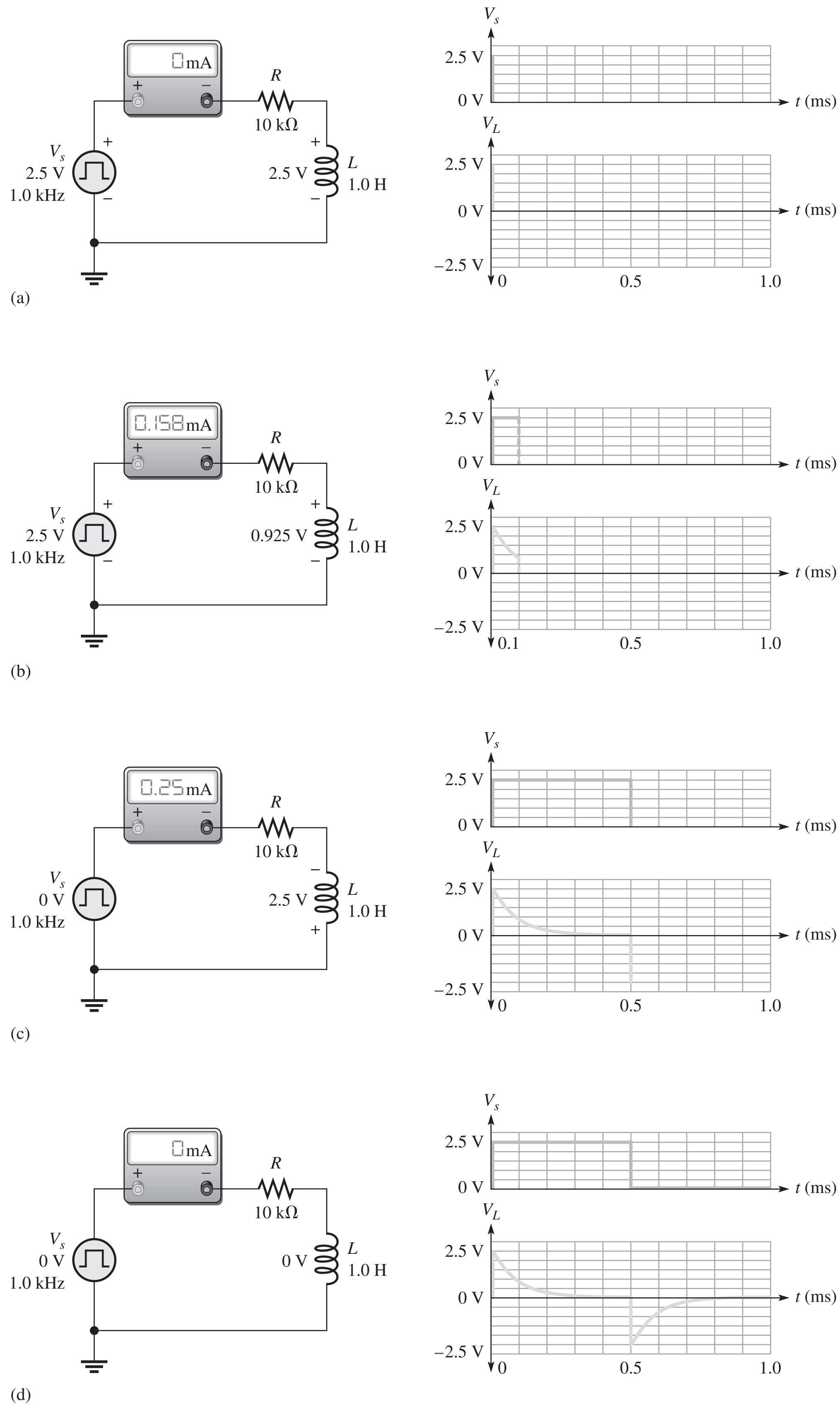
$$i = 0.25\text{ mA} - 0.63(0.25\text{ mA}) = \mathbf{0.092\text{ mA}}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la corriente en 0.2 ms y 0.8 ms?

Voltajes en un circuito *RL* en serie

Como se sabe, cuando la corriente cambia en un inductor, se induce un voltaje. Examinemos lo que le sucede al voltaje inducido a través del inductor en el circuito en serie mostrado en la figura 13-25 durante un ciclo completo de una entrada de onda cuadrada. Tenga en cuenta que el generador produce un nivel parecido a conmutar una fuente de cd a la posición de encendido y luego colocar una trayectoria de baja resistencia "automática" (idealmente de cero) entre las terminales de la fuente cuando regresa a su nivel de cero.

Un amperímetro colocado en el circuito muestra la corriente que circula por el circuito en cualquier instante. La forma de onda V_L es el voltaje presente entre las terminales del inductor.



0 mA
R
10 kΩ
V_s
2.5 V
1.0 kHz
2.5 V
L
1.0 H
(a)
0.158 mA
0.925 V
(b)
0.25 mA
0 V
(c)
(d)
V_s
V_L
2.5 V
0 V
−2.5 V
t (ms)
0
0.1
0.5
1.0

▲ FIGURA 13–25

En la figura 13-25(a), la onda cuadrada acaba de pasar de cero a su valor máximo de 2.5 V. De acuerdo con la ley de Lenz, se induce un voltaje entre las terminales del inductor que se opone a este *cambio* conforme aumenta el campo magnético que circunda el inductor. No hay corriente en el circuito debido al voltaje igual pero opuesto.

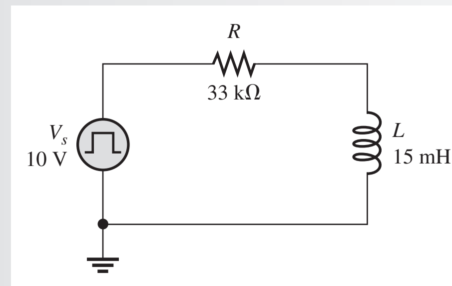
A medida que aumenta el campo magnético, el voltaje inducido entre las terminales del inductor disminuye y la corriente fluye en el circuito. Después de 1τ, el voltaje inducido entre las terminales del inductor disminuye en un 63%, lo cual propicia que la corriente se incremente en un 63% a 0.158 mA. Esto se muestra en la figura 13-25(b) al final de una constante de tiempo (0.1 ms).

El voltaje presente en el inductor continúa disminuyendo exponencialmente hasta cero, punto en el cual la corriente está limitada sólo por la resistencia del circuito. Luego la onda cuadrada regresa a cero (en $t = 0.5$ ms) como se muestra en la figura 13-25(c). De nuevo se induce un voltaje entre las terminales del inductor que se opone a este cambio. Esta vez, la polaridad del voltaje del inductor se invierte debido al campo magnético menguante. Aunque la fuente de voltaje es 0, el campo magnético menguante mantiene la corriente en la misma dirección hasta que la corriente disminuye a cero, como ilustra la figura 13-25(d).

EJEMPLO 13–9

(a) El circuito mostrado en la figura 13-26 tiene una entrada de onda cuadrada. ¿Cuál es la frecuencia más alta que se puede utilizar y que permita seguir observando la forma de onda completa entre las terminales del inductor?

(b) Suponga que el generador se ajusta a la frecuencia determinada en (a). Describa la forma de onda del voltaje presente entre las terminales del resistor.



▲ FIGURA 13–26

Solución

(a) $\tau = \dfrac{L}{R} = \dfrac{15\text{ mH}}{33\text{ k}\Omega} = 0.454\ \mu\text{s}$

El periodo tiene que ser diez veces más largo que τ para observar la onda completa.

$$T = 10\tau = 4.54\ \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4.54\ \mu\text{s}} = \mathbf{220\ kHz}$$

(b) El voltaje entre las terminales del resistor es de la misma forma que la forma de onda de la corriente. La forma general se mostró en la figura 13-24 y su valor máximo es de 10 V (el mismo V_S asumiendo que no hay resistencia de devanado).

Problema relacionado ¿Cuál es el voltaje máximo entre las terminales del resistor con $f = 220$ kHz?



Use el archivo Multisim E13-09 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Las fórmulas exponenciales

Las fórmulas para voltaje y corriente exponenciales en un circuito *RL* son similares a las utilizadas en el capítulo 12 para el circuito *RC*, y las curvas exponenciales universales mostradas en la figura 12-36 son aplicables a inductores y capacitores. Las fórmulas generales para circuitos *RL* se fundamentan como sigue

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-Rt/L}$$ **Ecuación 13–9**

$$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-Rt/L}$$ **Ecuación 13–10**

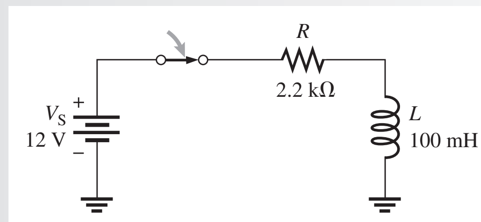
donde V_F e I_F son valores finales de voltaje y corriente. V_i e I_i son los valores iniciales de voltaje y corriente. Las letras minúsculas cursivas v e i representan los valores instantáneos de voltaje y corriente en el inductor en el instante t.

Corriente creciente La fórmula para el caso especial en que una curva de corriente exponencial creciente comienza en cero se deriva al establecer $I_i = 0$ en la ecuación 13-10.

$$i = I_F(1 - e^{-Rt/L})$$ **Ecuación 13–11**

Con la ecuación 13-11, se puede calcular el valor de la corriente creciente en el inductor en cualquier instante. Es posible determinar el voltaje sustituyendo i por v e I_F por V_F en la ecuación 13-11. Advierta que el exponente Rt/L también se escribe como $t/(L/R) = t/\tau$.

EJEMPLO 13–10 En la figura 13-27, determine la corriente que circula a través del inductor 30 μs después de que se cierra el interruptor.



▲ **FIGURA 13–27**

Solución La constante de tiempo es

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{100\text{ mH}}{2.2\text{ k}\Omega} = 45.5\ \mu\text{s}$$

La corriente final es

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{12\text{ V}}{2.2\text{ k}\Omega} = 5.45\text{ mA}$$

La corriente inicial es de cero. Observe que el intervalo de 30 μs es menor que una constante de tiempo, así que la corriente alcanzará menos del 63% de su valor final en ese tiempo.

$$i_L = I_F(1 - e^{-Rt/L}) = 5.45\text{ mA}(1 - e^{-0.66}) = 5.45\text{ mA}(1 - 0.517) = \mathbf{2.63\text{ mA}}$$

Problema relacionado En la figura 13-27, determine la corriente que circula en el inductor 55 μs después de que se cierra el interruptor.

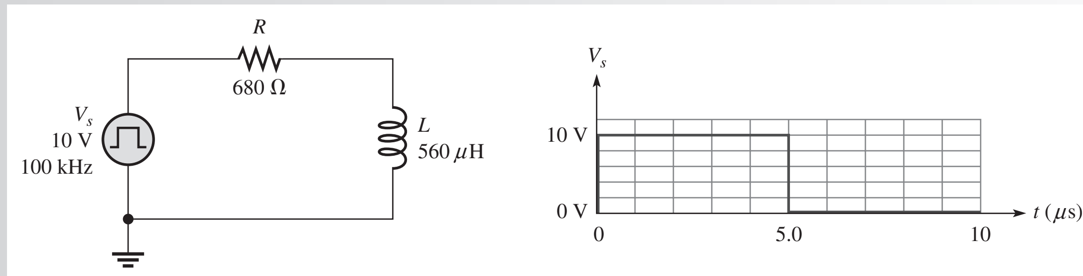
Corriente menguante La fórmula para el caso especial en que una corriente exponencial menguante llega a un valor final de cero se deriva estableciendo $I_F = 0$ en la ecuación 13-10.

Ecuación 13–12

$$i = I_i e^{-Rt/L}$$

Esta fórmula puede ser usada para calcular el decremento de la corriente del inductor en cualquier instante como lo muestra el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 13–11 En la figura 13-28, ¿cuál es la corriente en cada intervalo de microsegundos para un ciclo completo de la onda cuadrada de entrada, V_S? Después de calcular la corriente en cada intervalo de tiempo, trace la forma de onda de la corriente.



▲ **FIGURA 13–28**

Solución

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{560\ \mu\text{H}}{680\ \Omega} = 0.824\ \mu\text{s}$$

Cuando el pulso va desde 0 hasta 10 V en $t = 0$, la corriente final es

$$I_F = \frac{V_s}{R} = \frac{10\text{ V}}{680\ \Omega} = 14.7\text{ mA}$$

Para la corriente creciente,

$$i = I_F(1 - e^{-Rt/L}) = I_F(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\text{En } 1\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(1 - e^{-1\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{10.3\ mA}$$

$$\text{En } 2\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(1 - e^{-2\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{13.4\ mA}$$

$$\text{En } 3\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(1 - e^{-3\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{14.3\ mA}$$

$$\text{En } 4\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(1 - e^{-4\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{14.6\ mA}$$

$$\text{En } 5\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(1 - e^{-5\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{14.7\ mA}$$

Cuando el pulso va desde 10 hasta 0 V en $t = 5\ \mu$s, la corriente disminuye exponencialmente. Para la corriente menguante.

$$i = I_i(e^{-Rt/L}) = I_i(e^{-t/\tau})$$

La corriente inicial es el valor en 5 μs, y es de 14.7 mA.

$$\text{En } 6\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(e^{-1\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{4.37\ mA}$$

$$\text{En } 7\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(e^{-2\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{1.30\ mA}$$

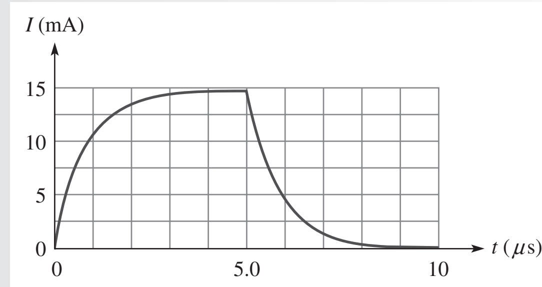
$$\text{En } 8\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(e^{-3\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{0.38\ mA}$$

$$\text{En } 9\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(e^{-4\mu\text{s}/0.824\mu\text{s}}) = \mathbf{0.11\ mA}$$

$$\text{En } 10\ \mu\text{s}: i = 14.7\text{ mA}(e^{-5\ \mu\text{s}/0.824\ \mu\text{s}}) = \mathbf{0.03\ mA}$$

La figura 13-29 es una gráfica de estos resultados.

▶ FIGURA 13–29



Problema relacionado ¿Cuál es la corriente en 0.5 μs?



Use el archivo Multisim E13-11 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 13-4

1. A través de un inductor de 15 mH con resistencia de devanado de 10 Ω fluye una corriente directa constante de 10 mA. ¿Cuál es la caída de voltaje en el inductor?
2. Se conecta una fuente de cd de 20 V a un circuito *RL* en serie con un interruptor. En el instante que se cierra el interruptor, ¿cuáles son los valores de *i* y v_L?
3. En el mismo circuito de la pregunta 2, luego de un intervalo de tiempo igual a 5τ después del cierre del interruptor, ¿cuál es v_L?
4. En un circuito *RL* en serie donde $R = 1.0\ \text{k}\Omega$ y $L = 500\ \mu\text{H}$, ¿cuál es la constante de tiempo? Determine la corriente 0.25 μs después de que un interruptor conecta 10 V en el circuito.

13–5 Inductores en circuitos de CA

Un inductor deja pasar corriente alterna con una cantidad de oposición llamada reactancia inductiva que depende de la frecuencia de la corriente alterna. El concepto de derivada se introdujo en el capítulo 12, y la expresión para voltaje inducido en un inductor ya se formuló en la ecuación 13-1. Utilizaremos dichos elementos otra vez en esta sección.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

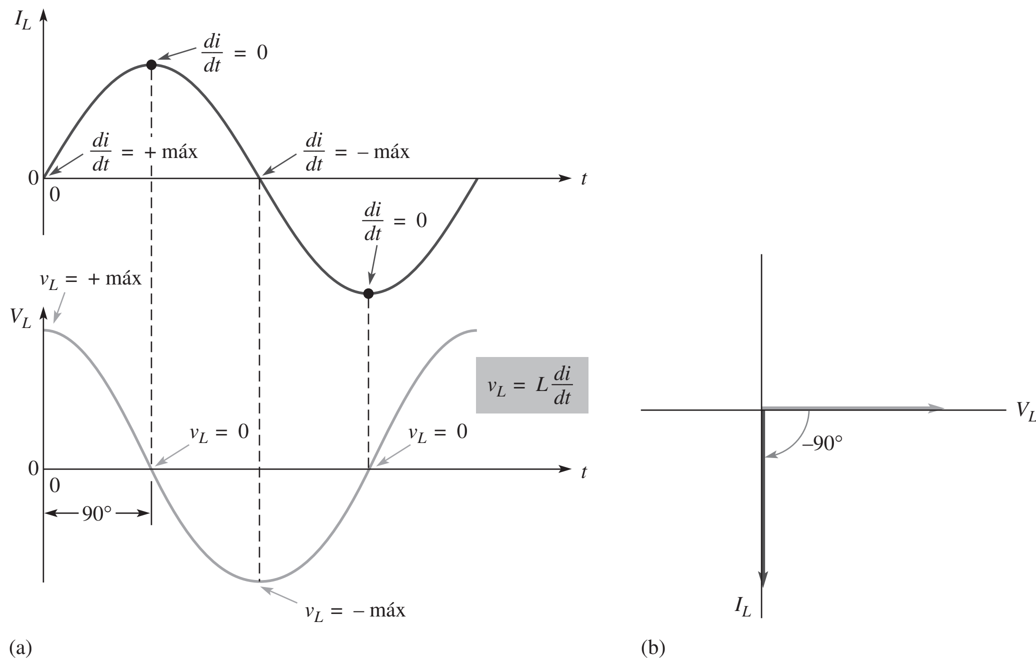
- **Analizar circuitos inductivos de ca**
  - Explicar por qué un inductor provoca un desplazamiento de fase entre el voltaje y la corriente
  - Definir el término *reactancia inductiva*
  - Determinar el valor de reactancia inductiva en un circuito dado
  - Analizar los conceptos de potencia instantánea, potencia real, y potencia reactiva en un inductor

Relación de fase de corriente y voltaje en un inductor

En la ecuación 13-1, que es la fórmula para voltaje inducido, observamos que mientras más rápido cambie la corriente que circula a través de un inductor, mayor será el voltaje inducido. Por ejemplo,

si la velocidad de cambio de la corriente es de cero, el voltaje es de cero [$v_{ind} = L(di/dt) = L(0) = 0$ V]. Cuando *di/dt* es un máximo dirigido hacia positivo, v_{ind} es un máximo positivo; cuando *di/dt* es un máximo dirigido hacia negativo, v_{ind} es un máximo negativo.

En circuitos inductivos, una corriente sinusoidal siempre induce voltaje sinusoidal. Por consiguiente, es posible graficar el voltaje con respecto a la corriente si se conocen los puntos en la curva de corriente donde el voltaje es de cero y donde es máximo. Esta relación de fase aparece en la figura 13-30(a). Advierta que el voltaje se adelanta en 90° con respecto a la corriente. Esto siempre es cierto en un circuito puramente inductivo. Los fasores de la figura 13-30(b) ilustran la corriente y el voltaje de esta relación.



▲ **FIGURA 13–30**

Relación de fase de V_L e I_L en un inductor. La corriente siempre se atrasa en 90° con respecto al voltaje.

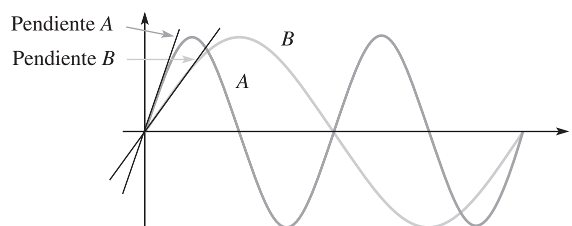
Reactancia inductiva, X_L

La **reactancia inductiva** es la oposición a la corriente sinusoidal, expresada en ohms. El símbolo para reactancia inductiva es X_L.

Para desarrollar la fórmula de la X_L, se utiliza la relación $v_{ind} = L(di/dt)$ y la curva de la figura 13-31. La rapidez de cambio de corriente está directamente relacionada con la frecuencia. Mientras más rápido cambia la corriente, más alta es la frecuencia. Por ejemplo, en la figura 13-31 se observa que la pendiente de la onda seno *A* en los cruces por cero es más pronunciada que la pendiente de la onda seno *B*. Recuerde que la pendiente de una curva en determinado punto indica la rapidez de cambio en dicho punto. La onda seno *A* tiene una frecuencia más alta que la onda seno *B*, de acuerdo con lo indicado por una razón de cambio máxima (*di/dt* es mayor en los cruces por cero).

▶ **FIGURA 13–31**

La pendiente indica la rapidez de cambio. La onda seno *A* tiene mayor rapidez de cambio en el cruce por cero que la onda seno *B*, y por tanto *A* tiene una frecuencia más alta.



Cuando se incrementa la frecuencia, *di/dt* se incrementa, y por tanto v_{ind} aumenta. Cuando la frecuencia disminuye, *di/dt* disminuye, y por tanto v_{ind} disminuye. El voltaje inducido depende directamente de la frecuencia,

$$\overset{\uparrow}{v_{\text{ind}}} = L(\overset{\uparrow}{di}/dt) \quad \text{y} \quad \underset{\downarrow}{v_{\text{ind}}} = L(\underset{\downarrow}{di}/dt)$$

Un incremento del voltaje inducido significa más oposición (X_L es mayor). Por consiguiente, X_L es directamente proporcional al voltaje inducido, y por tanto, directamente proporcional a la frecuencia.

X_L es proporcional a *f*.

Ahora, si *di/dt* es constante y la inductancia cambia, un incremento de *L* produce un incremento de v_{ind}, y una disminución en *L* causa que v_{ind} disminuya.

$$\overset{\uparrow}{v_{\text{ind}}} = \overset{\uparrow}{L}(di/dt) \quad \text{y} \quad \underset{\downarrow}{v_{\text{ind}}} = \underset{\downarrow}{L}(di/dt)$$

De nueva cuenta, un incremento de v_{ind} significa más oposición (mayor X_L). Por consiguiente, X_L es directamente proporcional al voltaje inducido, y por tanto, directamente proporcional a la inductancia. La reactancia inductiva es directamente proporcional tanto a *f* como a *L*.

X_L es proporcional a *fL*.

La fórmula (derivada en el apéndice B) para reactancia inductiva, X_L, es

$$X_L = 2\pi fL$$ **Ecuación 13–13**

La reactancia inductiva, X_L, está en ohms cuando *f* está en hertz y *L* en henries. Igual que con la reactancia capacitiva, el término 2π es un factor constante en la ecuación, el cual se deriva de la relación de una onda seno con el movimiento rotatorio.

EJEMPLO 13–12 Se aplica un voltaje sinusoidal al circuito de la figura 13-32. La frecuencia es de 10 kHz. Determine la reactancia inductiva.

▶ FIGURA 13–32



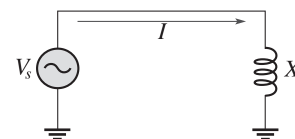
Solución Convierta 10 kHz en 10×10^3 Hz y 5 mH en 5×10^{-3} H. Por consiguiente, la reactancia inductiva es

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10 \times 10^3 \text{ Hz})(5 \times 10^{-3} \text{ H}) = \mathbf{314\ \Omega}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la X_L en la figura 13-32 si la frecuencia se incrementa a 35 kHz?

Ley de Ohm La reactancia de un inductor es análoga a la resistencia de un resistor como se muestra en la figura 13-33. De hecho, X_L, al igual que X_C y *R*, está expresada en ohms. Como la reactancia inductiva es una forma de oposición a la corriente, la ley de Ohm es aplicable tanto a circuitos inductivos como a circuitos resistivos y capacitivos; y se formula como sigue:

$$I = \frac{V}{X_L}$$

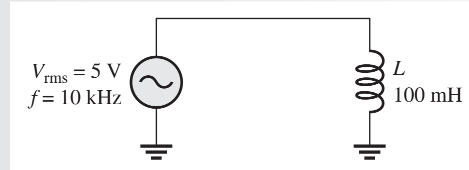


▲ FIGURA 13–33

Cuando se aplica la ley de Ohm en circuitos de ca, tanto la corriente como el voltaje se deben expresar de igual modo, es decir, ambos en rms, ambos en valores pico, y así sucesivamente.

EJEMPLO 13–13 Determine la corriente rms en la figura 13-34.

▶ **FIGURA 13–34**



Solución Convierta 10 kHz en 10×10^3 Hz y 100 mH en 100×10^{-3} H. En seguida calcule X_L.

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10 \times 10^3\ \text{Hz})(100 \times 10^{-3}\ \text{H}) = 6283\ \Omega$$

Aplique la ley de Ohm para determinar la corriente rms.

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{X_L} = \frac{5\ \text{V}}{6283\ \Omega} = \mathbf{796\ \mu A}$$

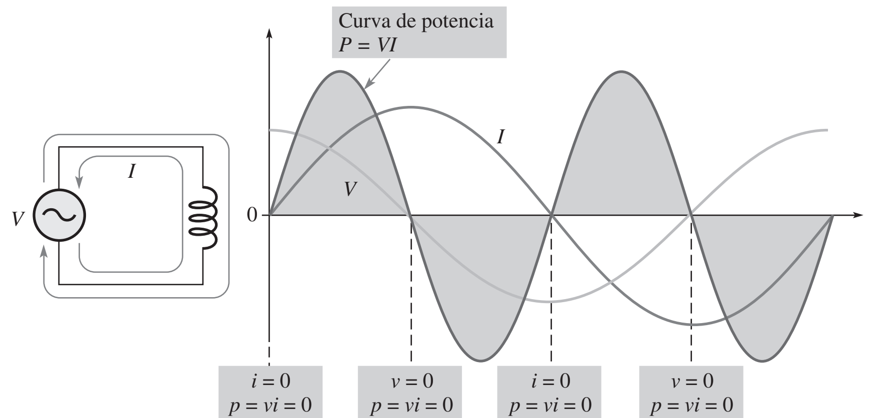
Problema relacionado Determine la corriente rms en la figura 13-34 con los siguientes valores: $V_{rms} = 12$ V, $f = 4.9$ kHz, y $L = 680$ mH.



Use el archivo Multisim E13-13 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Potencia en un inductor

Tal como previamente fue analizado, un inductor guarda energía en su campo magnético cuando a través de él fluye corriente. Un inductor ideal (suponiendo que no hay resistencia de devanado) no disipa energía, sólo la guarda. Cuando se aplica un voltaje de ca a un inductor ideal, el inductor almacena energía durante una parte del ciclo; en seguida la energía guardada regresa a la fuente durante otra parte del ciclo. En un inductor ideal no se pierde energía neta a causa de la conversión en calor. La figura 13-35 muestra la curva de potencia que resulta de un ciclo de corriente o de voltaje en el inductor.



▲ **FIGURA 13–35**

Curva de potencia.

Potencia instantánea (p) El producto de v por i proporciona potencia instantánea. En puntos donde v o i son cero, p también es cero. Cuando tanto v como i son positivos, p es igualmente positiva. Si v o i son positivos y la otra variable (v o i) es negativa, p es negativa. Cuando v e i son negativos, p es positiva. Como se observa en la figura 13-35, la potencia sigue una curva de forma sinusoidal. Los valores de potencia positivos indican que el inductor está guardando energía. Los valores de potencia negativos indican que el inductor está devolviendo energía a la fuente. Advierta que la potencia fluctúa a una frecuencia que es dos veces la frecuencia del voltaje o de la corriente conforme se guarda o regresa energía alternadamente a la fuente.

Potencia real (P_{real}) De modo ideal, toda la energía guardada por un inductor durante la parte positiva del ciclo de potencia es regresada a la fuente durante la parte negativa. No se pierde energía neta por la conversión en calor en el inductor, por lo que la potencia real es de cero. En realidad, debido a la resistencia de devanado presente en un inductor práctico, siempre se disipa algo de potencia; y existe una cantidad muy pequeña de potencia real, la cual normalmente puede ser ignorada.

$$P_{real} = (I_{rms})^2 R_W$$ **Ecuación 13–14**

Potencia reactiva (P_r) La rapidez a la cual un inductor guarda o regresa energía se conoce como su **potencia reactiva**, con la unidad de VAR (volt-ampere reactivo). La potencia reactiva es una cantidad distinta de cero porque en cualquier instante el inductor está tomando energía de la fuente o regresando energía a ella. La potencia reactiva no representa una pérdida de energía provocada por la conversión en calor. Las fórmulas siguientes son aplicables:

$$P_r = V_{rms} I_{rms}$$ **Ecuación 13–15**

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_L}$$ **Ecuación 13–16**

$$P_r = I_{rms}^2 X_L$$ **Ecuación 13–17**

EJEMPLO 13–14 Se aplica una señal de 10 V rms con frecuencia de 1 kHz a una bobina de 10 mH que tiene resistencia de devanado insignificante. Determine la potencia reactiva (P_r).

Solución En primer lugar, encuentre la reactancia inductiva y los valores de corriente.

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\text{ kHz})(10\text{ mH}) = 62.8\ \Omega$$

$$I = \frac{V_s}{X_L} = \frac{10\text{ V}}{62.8\ \Omega} = 159\text{ mA}$$

Luego, utilice la ecuación 13-17.

$$P_r = I^2 X_L = (159\text{ mA})^2(62.8\ \Omega) = \mathbf{1.59\ VAR}$$

Problema relacionado ¿Qué le sucede a la potencia reactiva si se incrementa la frecuencia?

El factor de calidad (Q) de una bobina

El **factor de calidad (Q)** es la razón de la potencia reactiva presente en un inductor a la potencia real que hay en la resistencia de devanado de la bobina o en la resistencia dispuesta en serie con la bobina. Es una razón de la potencia en L a la potencia en R_W. El factor de calidad es importante en circuitos resonantes, los cuales se estudian en el capítulo 17. Una fórmula para Q se desarrolla como sigue:

$$Q = \frac{\text{potencia creativa}}{\text{potencia real}} = \frac{I^2 X_L}{I^2 R_W}$$

La corriente es la misma en L y R_W; por tanto, los términos I^2 se eliminan, y queda

Ecuación 13–18

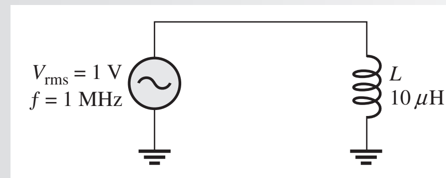
$$Q = \frac{X_L}{R_W}$$

Cuando la resistencia es exactamente la resistencia de devanado de la bobina, el circuito Q y la bobina Q son los mismos. Advierta que Q es una razón de unidades iguales y, por consiguiente, no tiene unidades. El factor de calidad se conoce también como Q sin carga porque está definido sin carga a través de la bobina.

REPASO DE LA SECCIÓN 13-5

1. Enuncie la relación de fase entre corriente y voltaje que existe en un inductor.
2. Calcule X_L con $f = 5$ kHz y $L = 100$ mH.
3. ¿A qué frecuencia la reactancia de un inductor de 50 μH es igual a 800 Ω?
4. Determine la corriente rms en la figura 13-36.
5. Se conecta un inductor ideal de 50 mH a una fuente de 12 V rms. ¿Cuál es la potencia real? ¿Cuál es la potencia reactiva a una frecuencia de 1 kHz?

▶ FIGURA 13–36



13–6 APLICACIONES DE LOS INDUCTORES

Los inductores no son tan versátiles como los capacitores y tienden a estar más limitados en sus aplicaciones debido en parte a su tamaño, a factores de costos y a su comportamiento no ideal (resistencia interna, etc.). Una de las aplicaciones más comunes de los inductores es para reducir el ruido en los dispositivos eléctricos.

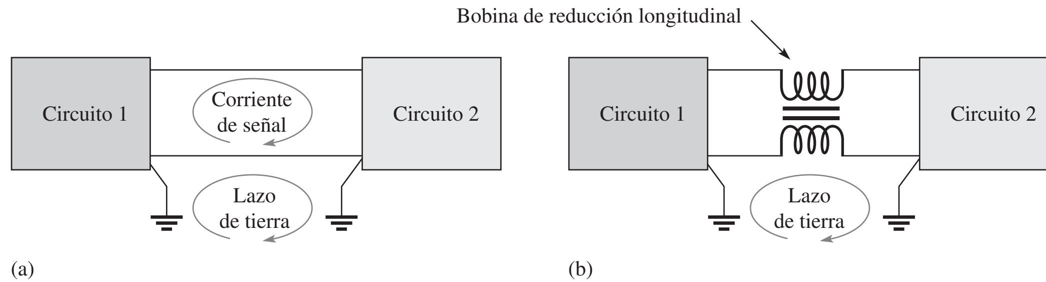
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar algunas aplicaciones de los inductores**
  - Examinar dos formas en las cuales entra ruido a un circuito
  - Describir el concepto de supresión de interferencia electromagnética (EMI)
  - Explicar cómo se utiliza un núcleo de ferrita
  - Analizar los fundamentos de los circuitos sintonizados

Supresión de ruido

Una de las aplicaciones más importantes de los inductores tiene que ver con la supresión de ruido eléctrico indeseable. Los inductores utilizados en estas aplicaciones, en general, se enrollan sobre un núcleo cerrado para evitar que el propio inductor se transforme en una fuente de ruido radiado. Dos tipos de ruido son el ruido conductivo y el ruido radiado.

Ruido conductivo Muchos sistemas tienen trayectorias conductivas comunes que conectan sus diferentes partes, esas trayectorias pueden conducir ruido de alta frecuencia de una a otra parte del sistema. Consideremos el caso de dos circuitos conectados con líneas comunes como se muestra en la figura 13-37(a). Existe una trayectoria para ruido de alta frecuencia a través de las tierras comunes, por lo que se crea una condición conocida como *lazo de tierra*. De modo particular, los lazos de tierra constituyen un problema en los sistemas de instrumentación, donde un



▲ **FIGURA 13–37**

transductor puede estar localizado a cierta distancia del sistema de grabación y la corriente de ruido presente en la tierra puede afectar la señal.

Si la señal de interés cambia lentamente, se puede instalar un inductor especial, llamado *bobina de reducción longitudinal*, en la línea de señal como se muestra en la figura 13-37(b). La bobina de reducción longitudinal es una forma de transformador (estudiado en el capítulo 14) que actúa como inductor en cada línea de señal. El lazo de tierra ve una trayectoria de alta impedancia, por lo que el ruido se reduce, en tanto que la señal de baja frecuencia se acopla por conducto de la baja impedancia de la bobina de reducción.

Los circuitos conmutadores también tienden a generar ruido de alta frecuencia (por encima de 10 MHz) gracias a los componentes de alta frecuencia presentes. (Recuerde por la sección 11-9 que una forma de onda pulsante contiene muchos armónicos de alta frecuencia.) Ciertos tipos de fuentes de potencia utilizan circuitos conmutadores de alta velocidad que son una fuente de ruido conductivo.

Como la impedancia de un inductor se incrementa con la frecuencia, los inductores son buenos para bloquear el ruido eléctrico producido por estas fuentes, la cuales deben transportar sólo corriente directa. A menudo se instalan inductores en las líneas de suministro de potencia para suprimir este ruido conductivo, de modo que un circuito no afecte adversamente a otro. También es posible utilizar uno o más capacitores junto con el inductor para mejorar la acción de filtrado.

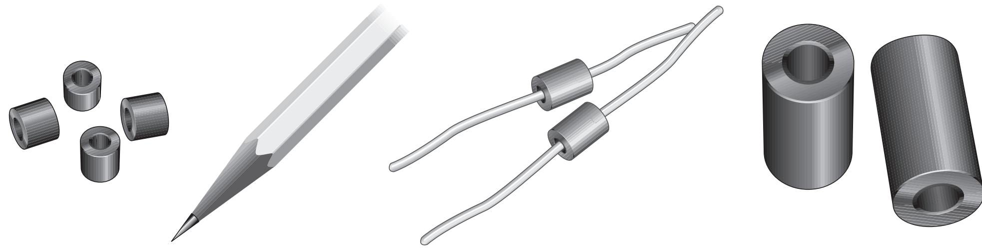
Ruido radiado El ruido también puede entrar a un circuito vía el campo eléctrico. La fuente de ruido puede ser un circuito adyacente o una fuente de potencia cercana. Existen varios métodos para abordar la reducción de los efectos del ruido radiado. En general, el primer paso es determinar la causa del ruido y aislarlo mediante protección o filtrado.

Los inductores se emplean ampliamente en filtros utilizados para suprimir ruido de radiofrecuencia. El inductor que se utilice en la supresión de ruido debe seleccionarse cuidadosamente a fin de que no se convierta a su vez en fuente de ruido radiado. Para frecuencias altas (>20 MHz), se utilizan mucho los inductores enrollados en núcleos toroidales altamente permeables, ya que tienden a mantener el flujo magnético restringido al núcleo.

Bobinas de RF (radiofrecuencia)

Los inductores utilizados para bloquear frecuencias muy altas se llaman *bobinas de radiofrecuencia* (*RF*). Las bobinas de RF se utilizan para ruido conductivo o radiado. Son inductores especiales diseñados para impedir que las altas frecuencias entren a, o salgan de algunas partes de un sistema al crear una trayectoria de gran impedancia para frecuencias altas. En general, la bobina se coloca en serie con la línea donde se requiere supresión de RF. Según la frecuencia de la interferencia, se requieren diferentes tipos de bobinas. Un tipo común de filtro de interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés) envuelve la línea de señal varias veces sobre un núcleo toroidal. Se prefiere la configuración toroidal porque contiene el campo magnético de modo que la propia bobina no se convierta en fuente de ruido.

Otro tipo común de bobina de RF es un núcleo de ferrita, tal como los ejemplares mostrados en la figura 13-38. Todos los alambres tienen inductancia, y el núcleo de ferrita es un material electromagnético pequeño que se inserta en el alambre para incrementar su inductancia. La impedancia presentada por el núcleo es una función tanto del material como de la frecuencia, así como también del tamaño del núcleo. Este tipo resulta ser una “bobina” eficaz y barata para altas frecuencias. Los núcleos de ferrita son comunes en sistemas de comunicación de alta frecuencia. En ocasiones se insertan varios núcleos en serie para incrementar la inductancia efectiva.



▶ **FIGURA 13–38**

Núcleos de ferrita. Se muestra un lápiz para ilustrar el tamaño relativo.

Circuitos sintonizados

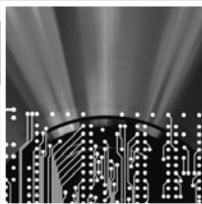
Se utilizan inductores junto con capacitores para proporcionar la selección de frecuencia en sistemas de comunicaciones. Estos circuitos sintonizados permiten seleccionar una banda angosta de frecuencias en tanto que otras frecuencias son rechazadas. Los sintonizadores de televisión y los receptores de radio están basados en este principio y permiten seleccionar un canal o una estación de entre muchas disponibles.

La selectividad de frecuencia se basa en el hecho de que la reactancia de capacitores e inductores depende de la frecuencia y de la interacción de estos dos componentes cuando se conectan en serie o en paralelo. Como el capacitor y el inductor producen desplazamientos de fase opuestos, se puede utilizar su oposición combinada a la corriente para obtener una respuesta deseada a cierta frecuencia seleccionada. Los circuitos *RLC* sintonizados se estudian en el capítulo 17.

REPASO DE LA SECCIÓN 13-6

1. Nombre dos tipos de ruido indeseable.
2. ¿Qué significan las siglas *EMI*?
3. ¿Cómo se utiliza un núcleo de ferrita?

Una aplicación de circuito

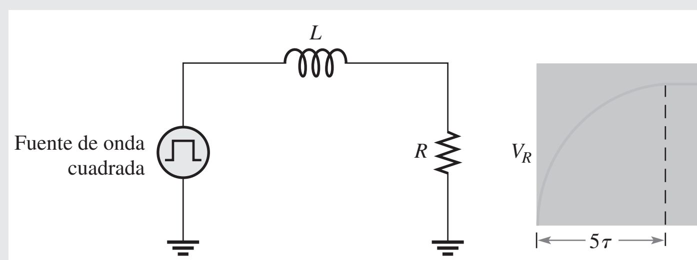


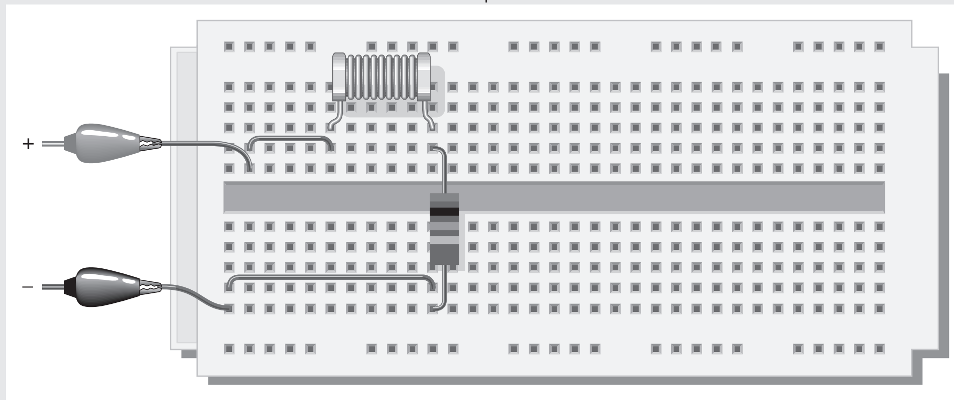
En esta aplicación, verá cómo se prueban bobinas, en busca de sus valores de inductancia desconocidos, por medio de un equipo de prueba que consiste en un generador de ondas cuadradas y un osciloscopio. Se le proporcionan dos bobinas cuyos valores de inductancia son desconocidos. Usted debe probar las bobinas con instrumentos de laboratorio simples para determinar los valores de inductancia. El método a seguir es colocar la bobina en serie con un resistor de valor conocido y medir la constante de tiempo. Conociendo la constante de tiempo y el valor de resistencia, puede calcularse el valor de *L*.

El método para determinar la constante de tiempo consiste en aplicar una onda cuadrada al circuito y medir el voltaje resultante entre las terminales del resistor. Cada vez que el voltaje de entrada de onda cuadrada se eleva, el inductor adquiere energía, y cada vez que la onda cuadrada regresa a cero, el inductor pierde energía. El tiempo necesario para que el voltaje exponencial del resistor se incremente a aproximadamente su valor final es igual a cinco constantes de tiempo. Esta operación está ilustrada en la figura 13-39. Para asegurarse de que la resistencia de devanado de la bobina puede ser ignorada, debe ser medida y el valor del resistor utilizado en el circuito debe seleccionarse para que sea considerablemente más grande que las resistencias de devanado y de la fuente.

▶ **FIGURA 13–39**

Circuito para medir la constante de tiempo.





▲ **FIGURA 13–40**

Montaje en una tarjeta de ensayo para medir la constante de tiempo.

La resistencia de devanado

Suponga que la resistencia de devanado de la bobina mostrada en la figura 13-40 se midió con un ohmmetro y se encontró que es de 85 Ω. A fin de lograr que las resistencias de devanado y de fuente sean insignificantes para la medición de la constante de tiempo, en el circuito se utiliza un resistor de 10 kΩ dispuesto en serie.

- ◆ Si se conectan 10 V de cd con las pinzas conductoras, tal como se muestra, ¿cuánta corriente fluye en el circuito luego de 5τ?

La inductancia de la bobina 1

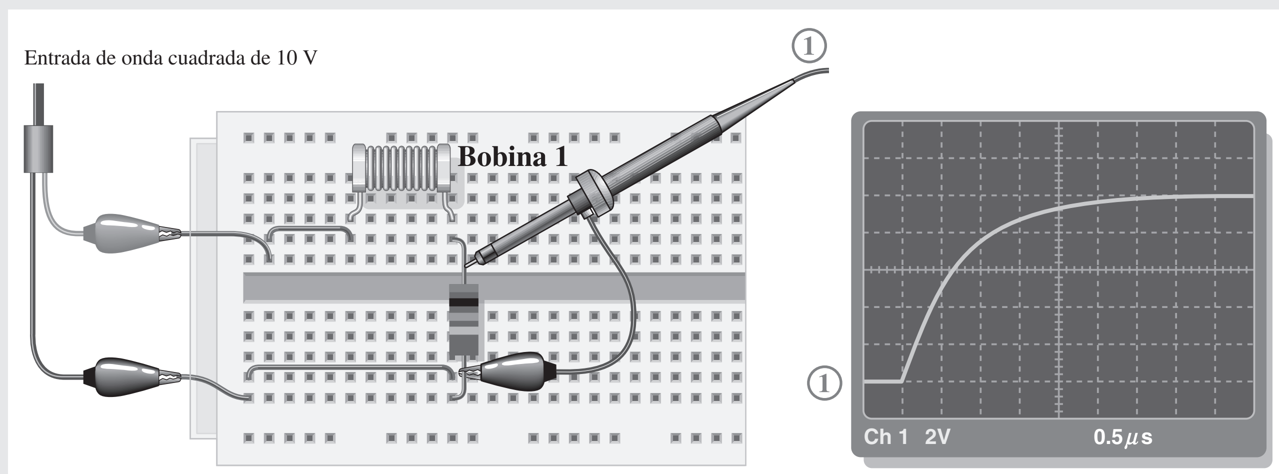
Consulte la figura 13-41. Para medir la inductancia de la bobina 1, se aplica un voltaje de onda cuadrada al circuito. La amplitud de la onda cuadrada se ajusta a 10 V. La frecuencia se ajusta de modo que el inductor tenga tiempo de adquirir energía a cabalidad durante cada pulso de onda cuadrada, el osciloscopio se ajusta para ver una curva energizante completa como se muestra.

- ◆ Determine la constante de tiempo aproximada del circuito.
- ◆ Encuentre la inductancia de la bobina 1.

La inductancia de la bobina 2

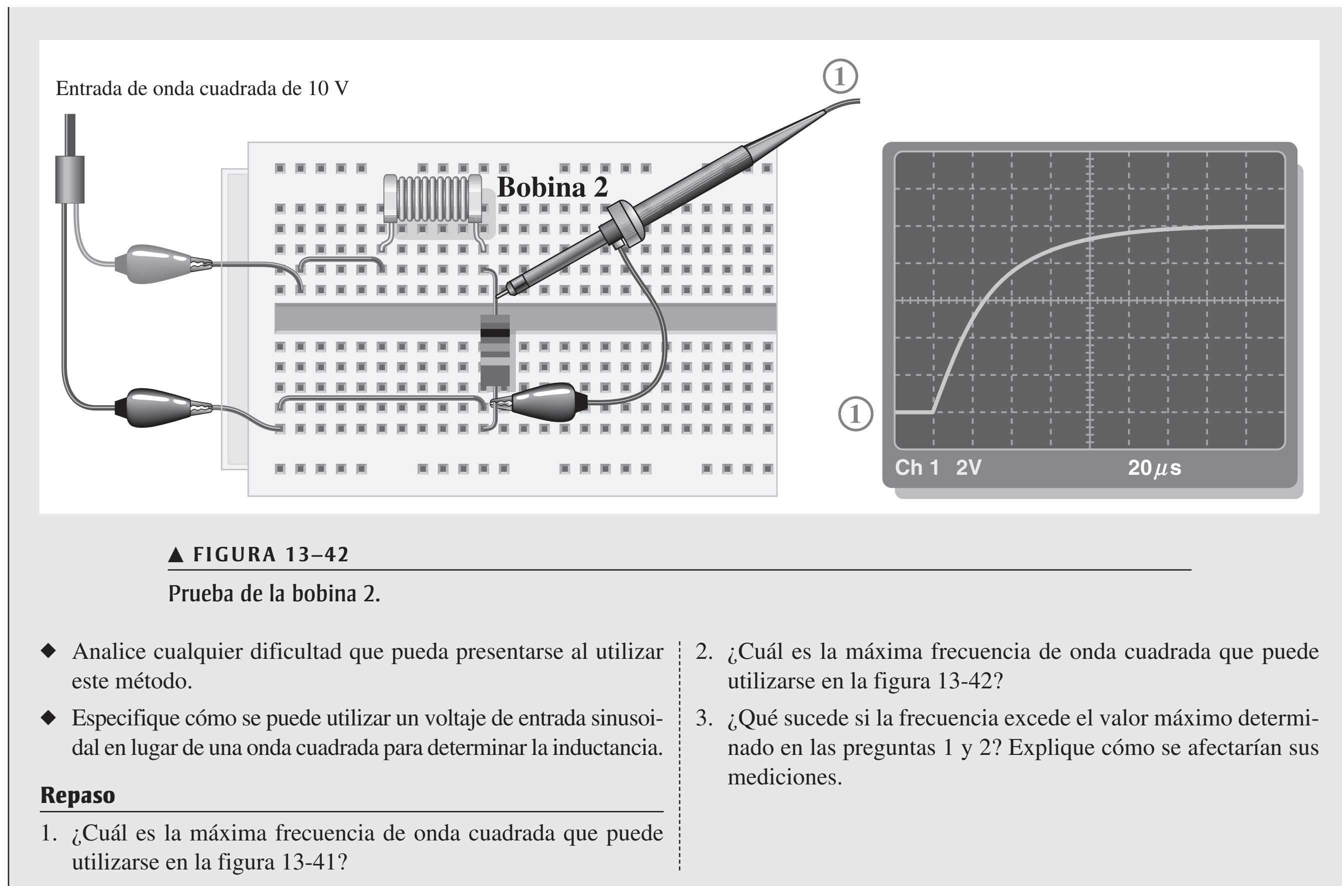
Consulte la figura 13-42, donde la bobina 2 reemplaza a la bobina 1. Para determinar la inductancia, se aplica una onda cuadrada de 10 V al circuito de ensayo. La frecuencia de la onda cuadrada se ajusta de modo que el inductor tenga tiempo de adquirir energía por completo durante cada pulso de onda cuadrada, el osciloscopio se ajusta para ver una curva energizante completa como se muestra.

- ◆ Determine la constante de tiempo aproximada del circuito.
- ◆ Encuentre la inductancia de la bobina 2.



▲ **FIGURA 13–41**

Prueba de la bobina 1.



▲ **FIGURA 13–42**

Prueba de la bobina 2.

- Analice cualquier dificultad que pueda presentarse al utilizar este método.
- Especifique cómo se puede utilizar un voltaje de entrada sinusoidal en lugar de una onda cuadrada para determinar la inductancia.

Repaso

1. ¿Cuál es la máxima frecuencia de onda cuadrada que puede utilizarse en la figura 13-41?
2. ¿Cuál es la máxima frecuencia de onda cuadrada que puede utilizarse en la figura 13-42?
3. ¿Qué sucede si la frecuencia excede el valor máximo determinado en las preguntas 1 y 2? Explique cómo se afectarían sus mediciones.

RESUMEN

- La inductancia es una medida de la capacidad de una bobina para establecer voltaje inducido como resultado de un cambio en su corriente.
- Un inductor se opone al cambio de su propia corriente.
- La ley de Faraday establece que el movimiento relativo entre un campo magnético y una bobina induce cierto voltaje en la bobina.
- La cantidad de voltaje inducido es directamente proporcional a la inductancia y a la rapidez de cambio en la corriente.
- La ley de Lenz establece que la polaridad del voltaje inducido es tal que la corriente inducida resultante fluye en una dirección que se opone al cambio del campo magnético que la produjo.
- Un inductor guarda energía en su campo magnético.
- Un henry es la cantidad de inductancia cuando la corriente, que cambia a razón de un ampere por segundo, induce un volt en el inductor.
- La inductancia es directamente proporcional al cuadrado de la cantidad de vueltas, a la permeabilidad, y al área de sección transversal del núcleo. Es inversamente proporcional a la longitud del núcleo.
- La permeabilidad de un material de núcleo indica la capacidad del material para establecer un campo magnético.
- La constante de tiempo de un circuito *RL* dispuesto en serie es la inductancia dividida entre la resistencia.
- En un circuito *RL*, el voltaje y la corriente crecientes o menguantes en un inductor provocan un cambio del 63% durante cada intervalo de constante de tiempo.
- Los voltajes y las corrientes crecientes y menguantes siguen curvas exponenciales.
- Los inductores se suman en serie.
- La inductancia total en paralelo es menor que la del inductor más pequeño dispuesto en paralelo.

- En un inductor, el voltaje aparece adelantado en 90° con respecto a la corriente.
- La reactancia inductiva, X_L, es directamente proporcional a la frecuencia y a la inductancia.
- En un inductor, la potencia real es cero; esto es, no se pierde energía en un inductor ideal debido a la conversión en calor, sólo en su resistencia de devanado.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas incluidos en el capítulo se definen en el glosario que aparece al final del libro.

Constante de tiempo *RL* Intervalo de tiempo fijo, establecido por los valores de L y R, que determina la respuesta en función del tiempo de un circuito y es igual a L/R.

Devanado Espiras o vueltas de alambre en un inductor.

Factor de calidad (*Q*) Es la razón de potencia reactiva a potencia real en un inductor.

Henry (H) Es la unidad de inductancia.

Inductancia Propiedad de un inductor mediante la cual un cambio de corriente causa que el inductor produzca un voltaje que se opone al cambio en la corriente.

Inductor Dispositivo eléctrico formado por un alambre que se enrolla alrededor de un núcleo y tiene la propiedad de inductancia; también es conocido como *bobina*.

Reactancia inductiva Oposición de un inductor a la corriente sinusoidal. La unidad es el ohm.

Voltaje inducido Voltaje que se produce como resultado de un cambio en el campo magnético.

FÓRMULAS

13–1	$v_{ind} = L\left(\frac{di}{dt}\right)$	Voltaje inducido
13–2	$W = \frac{1}{2}LI^2$	Energía guardada por un inductor
13–3	$L = \frac{N^2\mu A}{l}$	Inductancia en función de parámetros físicos
13–4	$v_{ind} = N\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$	Ley de Faraday
13–5	$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n$	Inductancia en serie
13–6	$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \frac{1}{L_n}$	Recíproco de la inductancia total en paralelo
13–7	$L_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}\right) + \left(\frac{1}{L_2}\right) + \left(\frac{1}{L_3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{L_n}\right)}$	Inductancia total en paralelo
13–8	$\tau = \frac{L}{R}$	Constante de tiempo
13–9	$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-Rt/L}$	Voltaje exponencial (general)
13–10	$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-Rt/L}$	Corriente exponencial (general)
13–11	$i = I_F(1 - e^{-Rt/L})$	Corriente exponencial creciente que comienza en cero
13–12	$i = I_i e^{-Rt/L}$	Corriente exponencial menguante que termina en cero
13–13	$X_L = 2\pi fL$	Reactancia inductiva
13–14	$P_{real} = (I_{rms})^2R_W$	Potencia real
13–15	$P_r = V_{rms}I_{rms}$	Potencia reactiva
13–16	$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_L}$	Potencia reactiva
13–17	$P_r = I_{rms}^2X_L$	Potencia reactiva
13–18	$Q = \frac{X_L}{R_W}$	Factor de calidad

AUTOEVALUACIÓN Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Una inductancia de 0.05 μH es mayor que
   (a) 0.0000005 H **(b)** 0.000005 H **(c)** 0.000000008 H **(d)** 0.00005 mH
2. Una inductancia de 0.33 mH es más pequeña que
   (a) 33 μH **(b)** 330 μH **(c)** 0.05 mH **(d)** 0.0005 H
3. Cuando la corriente que circula a través de un inductor se incrementa, la cantidad de energía guardada en el campo electromagnético
   (a) disminuye **(b)** permanece constante **(c)** aumenta **(d)** se duplica
4. Cuando la corriente que circula a través de un inductor se duplica, la energía guardada
   (a) se duplica **(b)** se cuadruplica **(c)** se reduce a la mitad **(d)** no cambia
5. La resistencia de devanado de una bobina se incrementa
   (a) al reducir la cantidad de vueltas **(b)** al utilizar un alambre más grande
   (c) al cambiar el material del núcleo **(d)** cualquier respuesta (a) o (b)
6. La inductancia de una bobina de núcleo de hierro se incrementa si
   (a) aumenta la cantidad de vueltas **(b)** se quita el núcleo de hierro
   (c) aumenta la longitud del núcleo **(d)** se utiliza un alambre más grande
7. Cuatro inductores de 10 mH están en serie. La inductancia total es
   (a) 40 mH **(b)** 2.5 mH **(c)** 40,000 μH **(d)** (d) las respuestas (a) y (c)
8. Tres inductores de 1 mH, 3.3 mH y 0.1 mH, respectivamente, se conectan en paralelo. La inductancia total es
   (a) 4.4 mH **(b)** mayor que 3.3 mH
   (c) menor que 0.1 mH **(d)** las respuestas (a) y (b)
9. Un inductor, un resistor y un interruptor se conectan en serie a una batería de 12 V. En el instante en que se cierra el interruptor, el voltaje en el inductor es de
   (a) 0 V **(b)** 12 V **(c)** 6 V **(d)** 4 V
10. Se aplica un voltaje sinusoidal entre las terminales de un inductor. Cuando la frecuencia del voltaje se incrementa, la corriente
    (a) disminuye **(b)** aumenta
    (c) no cambia **(d)** momentáneamente se va a cero
11. Un inductor y un resistor están en serie con una fuente de voltaje sinusoidal. La frecuencia se ajusta de modo que la reactancia inductiva sea igual a la resistencia. Si la frecuencia se incrementa, entonces
    (a) $V_R > V_L$ **(b)** $V_L < V_R$ **(c)** $V_L = V_R$ **(d)** $V_L > V_R$
12. Se conecta un ohmmetro entre las terminales de un inductor y la aguja indica un valor infinito. El inductor
    (a) es bueno **(b)** está abierto **(c)** está en cortocircuito **(d)** es resistivo

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 13-45.

1. El interruptor está en la posición 1. Cuando se pone en la posición 2, la inductancia entre *A* y *B*
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia
2. Si el interruptor se mueve de la posición 3 a la posición 4, la inductancia entre *A* y *B*
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

Consulte la figura 13-48.

3. Si *R* fuera de 10 kΩ en lugar de 1.0 kΩ y el interruptor se cierra, el tiempo requerido para que la corriente alcance su valor máximo
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(b)** no cambia

4. Si L disminuye de 10 mH a 1 mH y el interruptor se cierra, la constante de tiempo

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

5. Si la fuente de voltaje cae de +15 V a +10 V, la constante de tiempo

(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 13-51.

6. Si la frecuencia de la fuente de voltaje se incrementa, la corriente total

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

7. Si L_2 se abre, la corriente a través de L_1

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

8. Si la frecuencia de la fuente de voltaje disminuye, la razón de los valores de las corrientes a través de L_2 y L_3

(**a**) se incrementa (**b**) disminuye (**c**) no cambia

Consulte la figura 13-52.

9. Si la frecuencia de la fuente de voltaje se incrementa, el voltaje a través de L_1

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

10. Si L_3 se abre, el voltaje a través de L_2

(**a**) aumenta (**b**) disminuye (**c**) no cambia

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican mediante un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 13–1 El inductor básico

1. Convierta los siguientes valores en milihenries:

(**a**) 1 H (**b**) 250 μH (**c**) 10 μH (**d**) 0.0005 H

2. Convierta los siguientes valores en microhenries:

(**a**) 300 mH (**b**) 0.08 H (**c**) 5 mH (**d**) 0.00045 mH

3. ¿Cuál es el voltaje en una bobina cuando $di/dt = 10$ mA/μs y $L = 5\ \mu$H?

4. Se inducen 50 volts en una bobina de 25 mH. ¿Con qué rapidez cambia la corriente?

5. La corriente a través de una bobina de 100 mH cambia a razón de 200 mA/s. ¿Cuánto voltaje se induce en la bobina?

6. ¿Cuántas vueltas se requieren para producir 30 mH con una bobina enrollada sobre un núcleo cilíndrico cuya área de sección transversal mide 10×10^{-5} m^2 y tiene longitud de 0.05 m? La permeabilidad del núcleo es de 1.2×10^{-6} H/m.

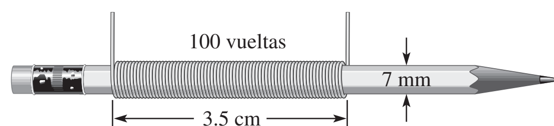
7. ¿Qué cantidad de energía se guarda en un inductor de 4.7 mH cuando la corriente es de 20 mA?

8. Compare la inductancia de dos inductores idénticos excepto que el inductor 2 tiene dos veces la cantidad de vueltas del inductor 1.

9. Compare la inductancia de dos inductores idénticos excepto que el inductor 2 está enrollado sobre un núcleo de hierro (permeabilidad relativa = 150) y el inductor 1 está enrollado sobre un núcleo de acero al bajo carbono (permeabilidad relativa = 200).

10. Un estudiante enrolla 100 vueltas de alambre sobre un lápiz de 7 mm de diámetro como se muestra en la figura 13-43. El lápiz es un núcleo no magnético de tal suerte que su permeabilidad es igual a la de un vacío ($4\pi \times 10^{-6}$ H/m). Determine la inductancia de la bobina que se formó.

▶ FIGURA 13–43

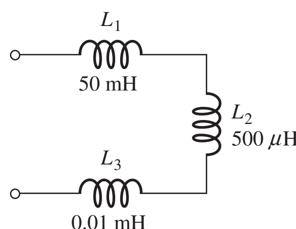


SECCIÓN 13–3 Inductores en serie y en paralelo

11. Se conectan cinco inductores en serie. El valor más bajo es de 5 μH. Si el valor de cada inductor es el doble del valor precedente, y si los inductores se conectan en orden de valores ascendentes, ¿cuál es la inductancia total?

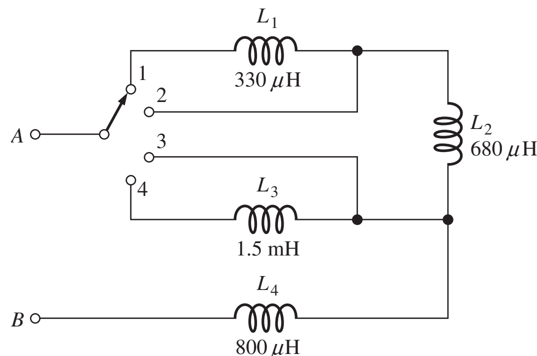
12. Usted requiere una inductancia total de 50 mH. Tiene disponibles una bobina de 10 mH y otra de 22 mH. ¿Cuánta inductancia adicional necesita?

13. Determine la inductancia total en la figura 13-44.



▲ **FIGURA 13–44**

14. En la figura 13-45, ¿cuál es la inductancia total entre los puntos A y B con cada posición del interruptor?

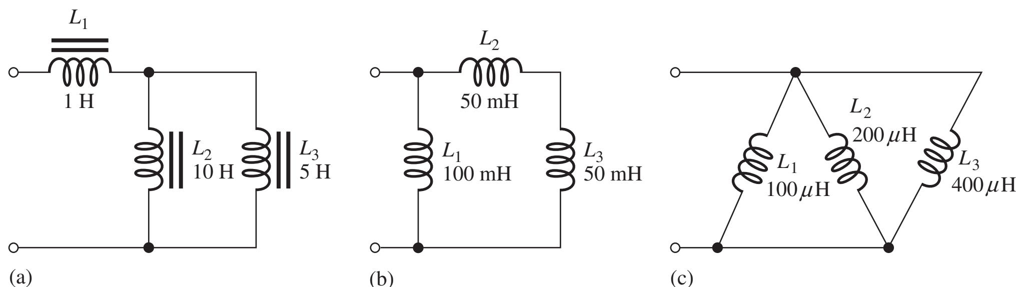


▲ **FIGURA 13–45**

15. Determine la inductancia total en paralelo para las siguientes bobinas dispuestas en paralelo: 75 μH, 50 μH, 25 μH, y 15 μH.

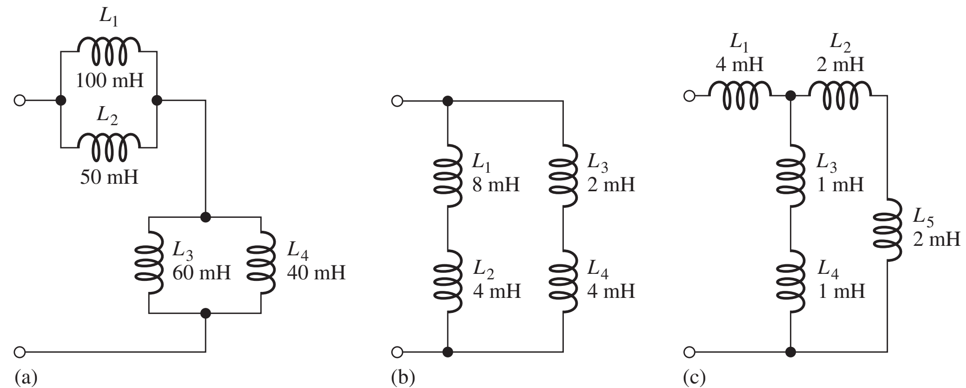
16. Usted tiene un inductor de 12 mH, y éste es su valor más bajo, pero necesita una inductancia de 8 mH. ¿Qué valor puede utilizar en paralelo con el inductor de 12 mH para obtener 8 mH?

17. Determine la inductancia total de cada circuito mostrado en la figura 13-46.



▲ **FIGURA 13–46**

18. Determine la inductancia total de cada circuito mostrado en la figura 13-47.



▲ **FIGURA 13–47**

SECCIÓN 13–4 Inductores en circuitos de cd

19. Determine la constante de tiempo para cada una de las siguientes combinaciones *RL* dispuestas en serie:

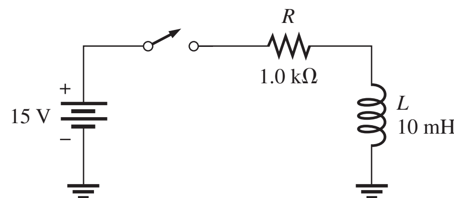
(a) $R = 100\ \Omega, L = 100\ \mu\text{H}$ **(b)** $R = 4.7\ \text{k}\Omega, L = 10\ \text{mH}$
(c) $R = 1.5\ \text{M}\Omega, L = 3\ \text{H}$

20. En un circuito *RL* en serie, determine cuánto tiempo se lleva la corriente para incrementarse a su valor total con cada una de las siguientes combinaciones:

(a) $R = 56\ \Omega, L = 50\ \mu\text{H}$ **(b)** $R = 3300\ \Omega, L = 15\ \text{mH}$
(c) $R = 22\ \text{k}\Omega, L = 100\ \text{mH}$

21. En el circuito de la figura 13-48, al inicio no hay corriente. Determine el voltaje en el inductor en los siguientes instantes tras de que se cierra el interruptor:

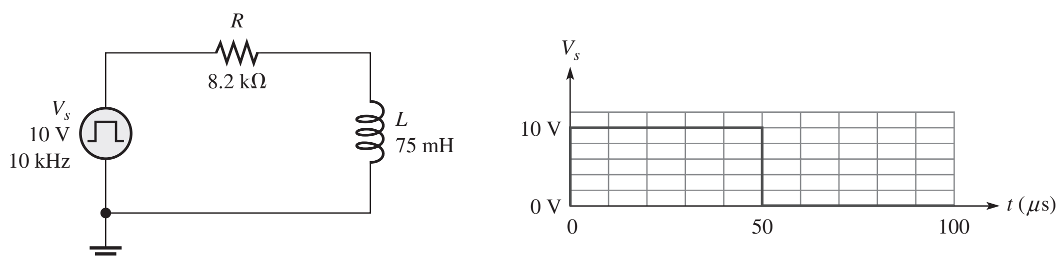
(a) $10\ \mu\text{s}$ **(b)** $20\ \mu\text{s}$ **(c)** $30\ \mu\text{s}$ **(d)** $40\ \mu\text{s}$ **(e)** $50\ \mu\text{s}$



▲ **FIGURA 13–48**

***22.** Para el inductor ideal de la figura 13-49, calcule la corriente en cada uno de los siguientes instantes:

(a) $10\ \mu\text{s}$ **(b)** $20\ \mu\text{s}$ **(c)** $30\ \mu\text{s}$



▲ **FIGURA 13–49**

23. Repita el problema 21 para los siguientes instantes:

(a) 2 μs **(b)** 5 μs **(c)** 15 μs

***24.** Repita el problema 22 para los siguientes instantes:

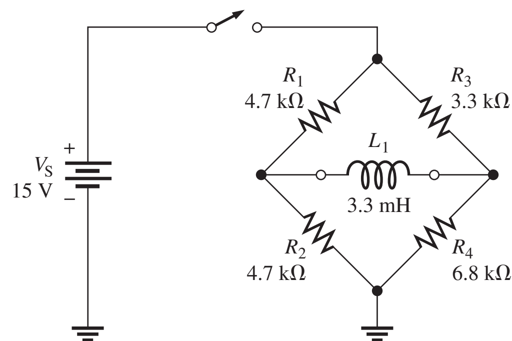
(a) 65 μs **(b)** 75 μs **(c)** 85 μs

25. En la figura 13-48, ¿en qué momento luego de que se cierra el interruptor el voltaje llega a 5 V?

26. **(a)** ¿Cuál es la polaridad del voltaje inducido en el inductor de la figura 13-49 cuando la onda cuadrada está creciendo?

(b) ¿Cuál es la corriente justo antes de que la onda cuadrada se reduzca a cero?

27. Determine la constante de tiempo para el circuito de la figura 13-50.



▲ FIGURA 13–50

***28.** **(a)** ¿Cuál es la corriente en el inductor 1.0 μs después de que se cierra el interruptor en la figura 13-50?

(b) ¿Cuál es la corriente después de que transcurren 5τ?

***29.** Para el circuito de la figura 13-50, suponga que el interruptor estuvo cerrado por más de 5τ y se abre. ¿Cuál es la corriente en el inductor 1.0 μs después de que se abre el interruptor?

SECCIÓN 13–5 Inductores en circuitos de ca

30. Determine la resistencia total para cada circuito de la figura 13-46 cuando se aplica voltaje a una frecuencia de 5 kHz entre las terminales.

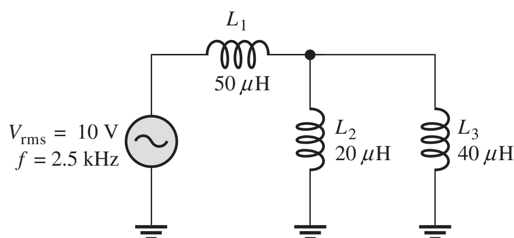
31. Determine la reactancia total para cada circuito de la figura 13-47 cuando se aplica voltaje a una frecuencia de 400 Hz.

32. En la figura 13-51, determine la corriente rms total. ¿Cuáles son las corrientes a través de L_2 y L_3?

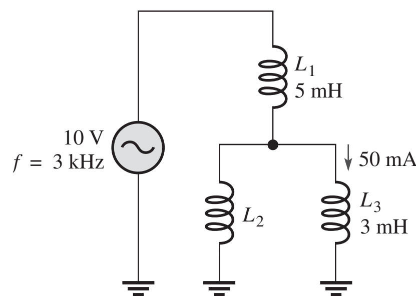
33. ¿Qué frecuencia producirá una corriente rms total de 500 mA en cada circuito de la figura 13-47 con un voltaje de entrada rms de 10 V?

34. En la figura 13-51, determine la potencia reactiva.

35. Determine I_{L2} en la figura 13-52.



▲ FIGURA 13–51



▲ FIGURA 13–52



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

36. Abra el archivo P13-36 y mida el voltaje en cada inductor.

37. Abra el archivo P13-37 y mida el voltaje en cada inductor.

38. Abra el archivo P13-38 y mida la corriente. Duplique la frecuencia y mida la corriente otra vez. Reduzca la frecuencia original a la mitad y mida la corriente. Explique sus observaciones.

39. Abra el archivo P13-39 y determine la falla si hay alguna.

40. Abra el archivo P13-40 y determine la falla si hay alguna.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 13–1 El inductor básico

1. La inductancia depende de la cantidad de vueltas de alambre, la permeabilidad, el área de sección transversal, y de la longitud del núcleo.

2. $v_{ind} = 7.5$ mV

3. **(a)** L se incrementa cuando N también lo hace.

(b) L disminuye cuando la longitud del núcleo aumenta.

(c) L disminuye cuando el área de sección transversal del núcleo disminuye.

(d) L disminuye cuando el núcleo ferromagnético es reemplazado por un núcleo de aire.

4. Todos los alambres tienen algo de resistencia, y como los inductores se fabrican a partir de vueltas de alambre, siempre hay resistencia.

5. En una bobina, las vueltas adyacentes actúan como las placas de un capacitor.

SECCIÓN 13–2 Tipos de inductores

1. Dos categorías de inductores son: fijos y variables.

2. **(a)** núcleo de aire **(b)** núcleo de hierro **(c)** variable

SECCIÓN 13–3 Inductores en serie y en paralelo

1. Las inductancias se suman en serie.

2. $L_T = 2.60$ mH

3. $L_T = 5(100 \text{ mH}) = 500$ mH

4. La inductancia total en paralelo es más pequeña que la del inductor de valor más pequeño dispuesto en paralelo.

5. Verdadero, el cálculo de la inductancia en paralelo es similar al cálculo de la resistencia en paralelo.

6. **(a)** $L_T = 24\ \mu$H **(b)** $L_T = 7.69$ mH

SECCIÓN 13–4 Inductores en circuitos de cd

1. $V_L = IR_W = 100$ mV

2. $i = 0$ V, $v_L = 20$ V

3. $v_L = 0$ V

4. $\tau = 500$ ns, $i_L = 3.93$ mA

SECCIÓN 13–5 Inductores en circuitos de ca

1. El voltaje va 90° delante de la corriente en un inductor.

2. $X_L = 2\pi fL = 3.14\ \text{k}\Omega$

3. $f = X_L/2\pi L = 2.55$ MHz

4. $I_{rms} = 15.9$ mA

5. $P_{real} = 0$ W; $P_r = 458$ mVAR

SECCIÓN 13–6 Aplicaciones de los inductores

1. Conductivo y radiado.
2. Interferencia electromagnética.
3. Se inserta un núcleo de ferrita en un alambre para incrementar su inductancia y se crea una bobina de RF.

Una aplicación de circuito

1. $f_{máx} = 125$ kHz ($5\tau = 4$ ms)
2. $f_{máx} = 3.13$ kHz ($5\tau = 160\ \mu$s)
3. Si $f > f_{máx}$, el inductor no se energizará por completo ya que $T/2 < 5\tau$.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

13–1 5 H

13–2 10.1 mH

13–3 0.5 Wb/s

13–4 150 μH

13–5 20.3 μH

13–6 227 ns

13–7 $I_F = 17.6$ mA, $\tau = 147$ ns

en 1τ: $i = 11.1$ mA; $t = 147$ ns

en 2τ: $i = 15.1$ mA; $t = 294$ ns

en 3τ: $i = 16.7$ mA; $t = 441$ ns

en 4τ: $i = 17.2$ mA; $t = 588$ ns

en 5τ: $i = 17.4$ mA; $t = 735$ ns

13–8 en 0.2 ms, $i = 0.215$ mA

en 0.8 ms, $i = 0.035$ mA

13–9 10 V

13–10 3.83 mA

13–11 6.7 mA

13–12 1.1 kΩ

13–13 573 mA

13–14 P_r disminuye.

AUTOEVALUACIÓN

1. (c) **2.** (d) **3.** (c) **4.** (b) **5.** (d) **6.** (a) **7.** (d) **8.**(c)
9. (b) **10.** (a) **11.** (d) **12.** (b)

EXAMEN RÁPIDO

1. (a) **2.** (b) **3.** (b) **4.** (b) **5.** (b)
6. (b) **7.** (b) **8.** (c) **9.** (c) **10.** (a)

TRANSFORMADORES

14

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Explicar la inductancia mutua
- Describir cómo se construye un transformador y cómo funciona
- Describir cómo los transformadores incrementan y disminuyen el voltaje
- Analizar el efecto de una carga resistiva a través del devanado secundario
- Analizar el concepto de carga reflejada en un transformador
- Analizar la igualación de impedancias con transformadores
- Describir un transformador no ideal
- Describir varios tipos de transformadores
- Localizar fallas en transformadores

TÉRMINOS CLAVE

- Acoplamiento magnético
- Devanado primario
- Devanado secundario
- Igualación de impedancia
- Inductancia mutua (IL_M)
- Potencia nominal aparente
- Relación de vueltas (*n*)
- Resistencia reflejada
- Toma central (CT, por sus siglas en inglés)
- Transformador

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de un circuito, usted aprenderá a localizar fallas en un tipo de fuente de potencia de cd que utiliza un transformador para acoplar el voltaje de ca tomado de una toma de corriente eléctrica estándar. Al medir el voltaje en varios puntos, es posible determinar si existe una falla y especificar la parte defectuosa de la fuente de potencia.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 13, usted aprendió acerca de la inductancia. En este capítulo, estudiará la inductancia mutua, que es la base para la operación de transformadores. Se utilizan transformadores en todo tipo de aplicaciones tales como fuentes de potencia, distribución de potencia eléctrica, y acoplamiento de señales en sistemas de comunicaciones.

La operación del transformador se basa en el principio de inductancia mutua, la cual ocurre si dos o más bobinas están muy cercanas una de otra. En realidad, un transformador simple se compone de dos bobinas que están acopladas de manera electromagnética por su inductancia mutua.
Como no existe contacto eléctrico entre dos bobinas magnéticamente acopladas, la transferencia de energía de una bobina a la otra se logra en una situación de completo aislamiento eléctrico. En relación con transformadores, el término *devanado o bobina* se utiliza comúnmente para describir el primario y el secundario.

14–1 INDUCTANCIA MUTUA

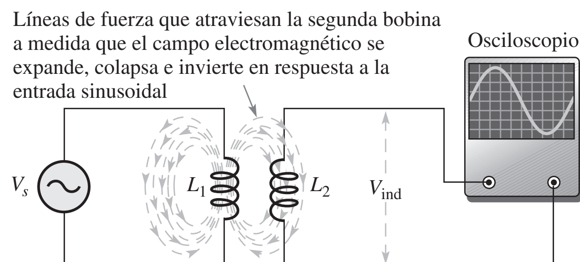
Cuando se colocan dos bobinas muy cercanas entre sí, el campo electromagnético variante producido por la corriente que fluye por una bobina provocará un voltaje inducido en la segunda bobina a causa de la inductancia mutua presente entre las dos bobinas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar la inductancia mutua**
  - Analizar el acoplamiento magnético
  - Definir el término *aislamiento eléctrico*
  - Definir el término *coeficiente de acoplamiento*
  - Identificar los factores que afectan la inductancia mutua y establecer la fórmula

Del capítulo 10, recuerde que el campo electromagnético que rodea una bobina de alambre se amplía, colapsa o invierte conforme la corriente aumenta, disminuye o se invierte.

Cuando una segunda bobina se coloca muy cerca de la primera de modo que las líneas de fuerza magnética variantes pasen a través de la segunda bobina, las bobinas están acopladas magnéticamente y se induce un voltaje, como indica la figura 14-1. Si dos bobinas están acopladas de manera magnética, crean **aislamiento eléctrico** porque no existe conexión eléctrica entre ellas, sino sólo un vínculo magnético. Si la corriente que fluye por la primera bobina es sinusoidal, el voltaje inducido en la segunda bobina también es sinusoidal. La cantidad de voltaje inducido en la segunda bobina a consecuencia de la corriente en la primera depende de la **inductancia mutua (L_M)**, que es la inductancia presente entre las dos bobinas. La inductancia de cada bobina y la cantidad de acoplamiento (k) entre las dos bobinas establecen la inductancia mutua. Para llevar al máximo el acoplamiento entre las dos bobinas, se enrollan en un núcleo común.



▶ **FIGURA 14–1**

Se induce un voltaje en la segunda bobina a consecuencia de la corriente cambiante en la primera bobina, lo cual produce un campo electromagnético cambiante que enlaza la segunda bobina.

Coeficiente de acoplamiento

El **coeficiente de acoplamiento, *k***, entre dos bobinas es la relación de las líneas de fuerza magnéticas (flujo) producidas por la bobina 1, y que enlazan la bobina 2 ($\phi_{1\text{-}2}$), con el flujo total producido por la bobina 1 (ϕ_1).

Ecuación 14–1

$$k = \frac{\phi_{1-2}}{\phi_1}$$

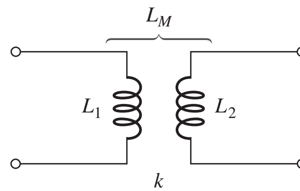
Por ejemplo, si la mitad del flujo producido por la bobina 1 enlaza la bobina 2, entonces $k = 0.5$. Un valor más grande de k indica que más voltaje se induce en la bobina 2 con cierta razón de cambio de la corriente que circula en la bobina 1. Observe que k no tiene unidades. Recordemos que la unidad para líneas de fuerza magnéticas (flujo) es el weber, abreviado Wb.

El coeficiente de acoplamiento, k, depende de la cercanía física de las bobinas y del tipo de material del núcleo sobre el cual están enrolladas. Asimismo, la construcción y forma de los núcleos son factores.

Fórmula para inductancia mutua

Los tres factores que influyen en la inductancia mutua (k, L_1 y L_2) se muestran en la figura 14-2. La fórmula para inductancia mutua es

$$L_M = k\sqrt{L_1L_2}$$ **Ecuación 14–2**



◀ **FIGURA 14–2**

La inductancia mutua de dos bobinas.

EJEMPLO 14–1 Una bobina produce un flujo magnético total de 50 μWb, y 20 μWb enlazan la bobina 2. ¿Cuál es el coeficiente de acoplamiento, k?

Solución

$$k = \frac{\phi_{1-2}}{\phi_1} = \frac{20\ \mu\text{Wb}}{50\ \mu\text{Wb}} = \mathbf{0.4}$$

*Problema relacionado** Determine k cuando $\phi_1 = 500\ \mu$Wb y $\phi_{1\text{-}2} = 375\ \mu$Wb.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 14–2 Dos bobinas están enrolladas en un solo núcleo, y el coeficiente de acoplamiento es de 0.3. La inductancia de la bobina 1 es de 10 μH, y la inductancia de la bobina 2 es de 15 μH. ¿Cuál es la L_M?

Solución

$$L_M = k\sqrt{L_1L_2} = 0.3\sqrt{(10\ \mu\text{H})(15\ \mu\text{H})} = \mathbf{3.67\ \mu H}$$

Problema relacionado Determine la inductancia mutua cuando $k = 0.5$, $L_1 = 1$ mH, y $L_2 = 600\ \mu$H.

REPASO DE LA SECCIÓN 14-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Defina el término *inductancia mutua*.
2. Dos bobinas de 50 mH tienen $k = 0.9$. ¿Cuál es la L_M?
3. Si se incrementa k, ¿qué le sucede al voltaje inducido en una bobina a consecuencia de un cambio de corriente en la otra bobina?

14–2 EL TRANSFORMADOR BÁSICO

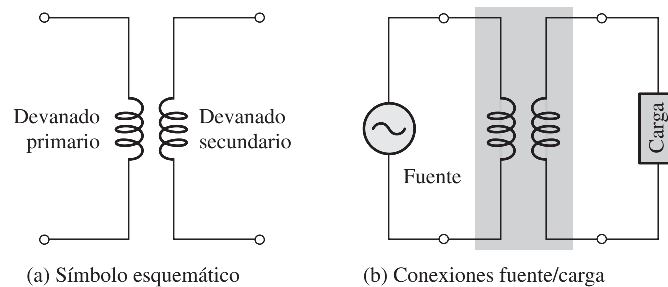
Un **transformador** básico es un dispositivo eléctrico construido a partir de dos bobinas de alambre (devanados) acopladas magnéticamente entre sí, de modo que existe inductancia mutua para la transferencia de potencia de un devanado al otro.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir cómo se construye y opera un transformador**
  - Identificar las partes de un transformador básico
  - Analizar la importancia del material del núcleo

- Analizar los conceptos de *devanado primario* y *devanado secundario*
- Definir el término *relación de vueltas*
- Analizar cómo el sentido de los devanados afecta las polaridades del voltaje

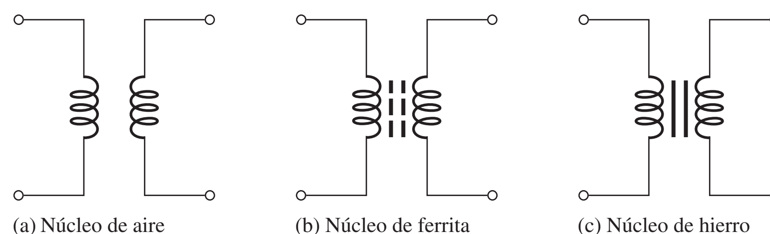
En la figura 14-3(a) se muestra el diagrama esquemático de un transformador. Como puede observarse, una bobina se llama **devanado primario** y la otra **devanado secundario**. La fuente de voltaje se aplica al devanado primario y la carga se conecta al devanado secundario, como indica la figura 14-3(b). El devanado primario es el devanado de entrada y el secundario es el devanado de salida. Es común referirse al lado del transformador que tiene la fuente de voltaje como *primario* y al lado que tiene el voltaje inducido como *secundario*.



▲ **FIGURA 14–3**

El transformador básico.

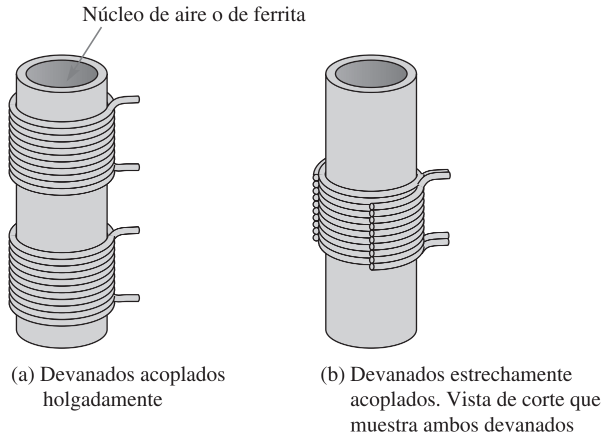
Los devanados de un transformador se forman alrededor del núcleo. Éste proporciona tanto una estructura física para colocar los devanados como una trayectoria magnética para que el flujo magnético se concentre cerca de las bobinas. Existen tres categorías generales de material de núcleo: aire, hierro, y ferrita. El símbolo esquemático para cada tipo se muestra en la figura 14-4.



▲ **FIGURA 14–4**

Símbolos esquemáticos basados en el tipo de núcleo.

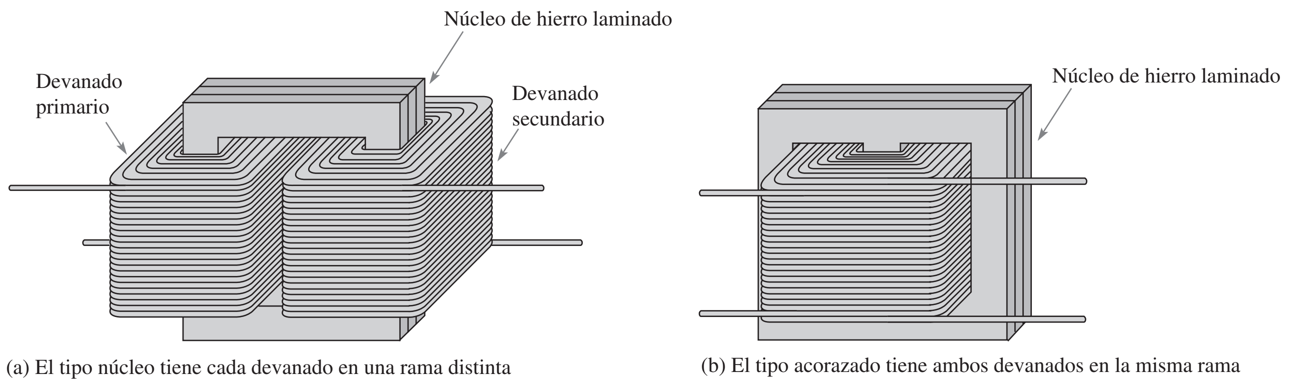
En general, en aplicaciones de alta frecuencia se utilizan transformadores de núcleo de aire y núcleo de ferrita que constan de devanados sobre una coraza aislante la cual es hueca (aire) o construida a partir de ferrita, como se ilustra en la figura 14-5. El alambre está protegido frecuentemente por un recubrimiento tipo barniz para evitar que los devanados se pongan en cortocircuito entre sí. El tipo de material del núcleo y las posiciones relativas de los devanados establecen la cantidad de **acoplamiento magnético** presente entre los devanados primario y secundario. En la figura 14-5(a), los devanados están acoplados holgadamente porque van separados, y en la parte (b) se acoplan estrechamente porque están traslapados. Mientras más estrecho es el acoplamiento, mayor es el voltaje inducido en el secundario para cierta cantidad dada en el primario.



◀ **FIGURA 14–5**

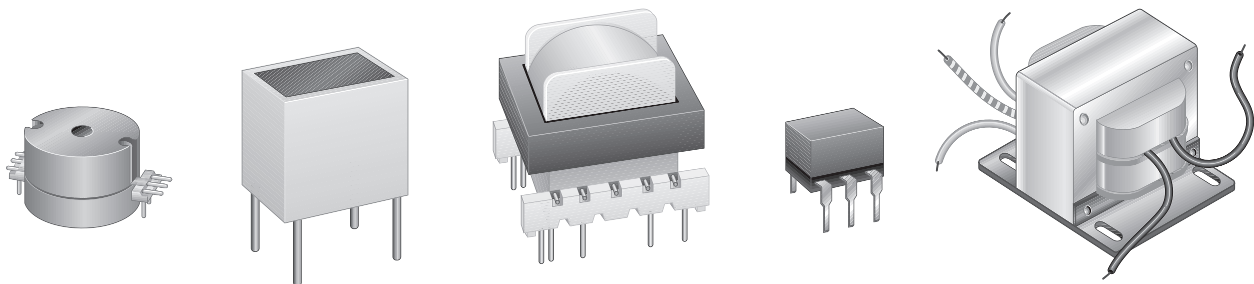
Transformadores con núcleos en forma de cilindro.

Los transformadores de núcleo de hierro se utilizan en general para frecuencia de audio (FA) y aplicaciones de potencia. Estos transformadores se componen de devanados sobre un núcleo construido a partir de hojas laminadas de material ferromagnético aisladas una de otra, según muestra la figura 14-6. Esta construcción proporciona una trayectoria fácil para el flujo magnético e incrementa la cantidad de acoplamiento entre los devanados. La figura 14-6 muestra la construcción básica de las dos configuraciones principales de transformadores de núcleo de hierro. En la construcción tipo núcleo, mostrada en la parte (a), los devanados están en ramas distintas del núcleo laminado. En la construcción tipo acorazado, que ilustra la parte (b), ambos devanados están en la misma rama. Cada tipo tiene ciertas ventajas. En general, el tipo núcleo tiene más espacio para aislar y puede manejar voltajes más altos. El tipo acorazado produce flujos magnéticos más intensos en el núcleo, por lo que requiere pocas vueltas. La figura 14-7 presenta una variedad de transformadores.



▲ **FIGURA 14–6**

Construcción de un transformador de núcleo de hierro con devanados de capa múltiple.



▲ **FIGURA 14–7**

Algunos tipos comunes de transformadores.

Relación de vueltas

Un parámetro de transformador que es útil para entender cómo funciona un transformador es la relación de vueltas. En este texto, la **relación de vueltas** (*n*) se define como la relación del número de vueltas que hay en el devanado secundario (N_{sec}) al número de vueltas presentes en el devanado primario (N_{pri}).

Ecuación 14–3

$$n = \frac{N_{sec}}{N_{pri}}$$

Esta definición de relación de vueltas está basada en el estándar IEEE para transformadores de potencia electrónicos tal como se especifica en el diccionario IEEE. Otras categorías de transformador pueden tener una definición diferente, así que algunas fuentes definen la relación de vueltas como N_{pri}/N_{sec}. Cualquier definición es correcta en tanto esté formulada claramente y sea utilizada en forma consistente. La relación de vueltas de un transformador rara vez, si es que ocurre en alguna ocasión, se da como especificación de transformador. En general, los voltajes de entrada y salida y la potencia nominal son las especificaciones clave. Sin embargo, la relación de vueltas resulta útil al estudiar el principio de operación de un transformador.

EJEMPLO 14–3 El devanado primario de un transformador tiene 100 vueltas y el secundario 400 vueltas. ¿Cuál es la relación de vueltas?

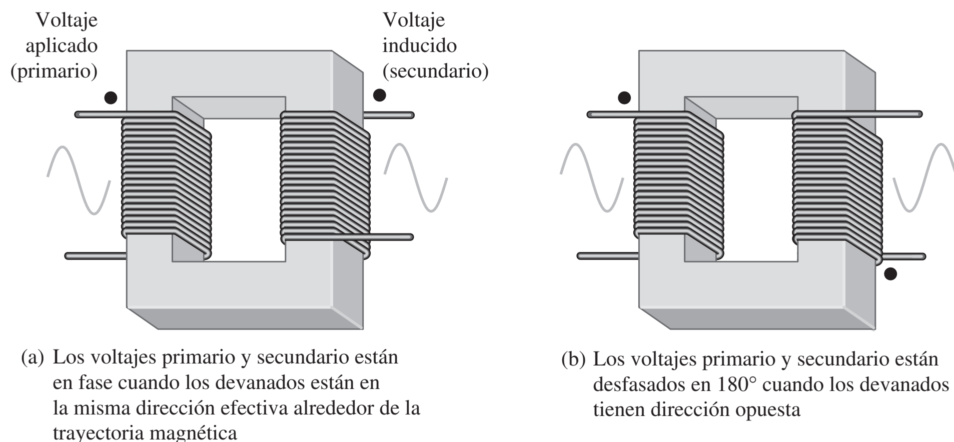
Solución $N_{sec} = 400$ y $N_{pri} = 100$; por consiguiente, la relación de vueltas es

$$n = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} = \frac{400}{100} = \mathbf{4}$$

Problema relacionado Cierto transformador tiene una relación de vueltas de 10. Si $N_{pri} = 500$, ¿cuál es N_{sec}?

Dirección de los devanados

Otro importante parámetro de un transformador es la dirección en la cual se colocan los devanados alrededor del núcleo. Como se ilustra en la figura 14-8, el sentido de los devanados determina la polaridad del voltaje a través del devanado secundario (voltaje secundario) con respecto al voltaje del devanado primario (voltaje primario). En los símbolos esquemáticos ocasionalmente se colocan puntos sobre las fases para señalar polaridades, como indica la figura 14-9.

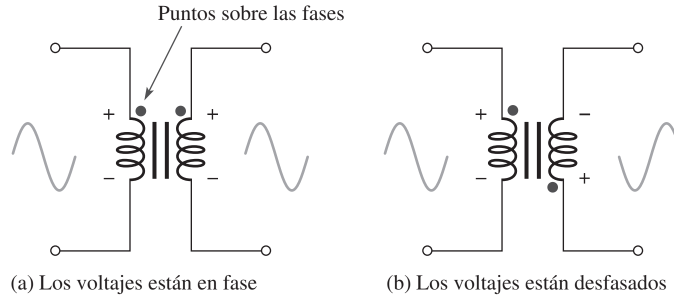


(a) Los voltajes primario y secundario están en fase cuando los devanados están en la misma dirección efectiva alrededor de la trayectoria magnética

(b) Los voltajes primario y secundario están desfasados en 180° cuando los devanados tienen dirección opuesta

▲ **FIGURA 14–8**

La dirección de los devanados determina las polaridades relativas de los voltajes.



▲ **FIGURA 14–9**

Los puntos sobre las fases indican las polaridades relativas de los voltajes primario y secundario.

REPASO DE LA SECCIÓN 14-2

1. ¿En qué principio está basada la operación de un transformador?
2. Defina el término *relación de vueltas*.
3. ¿Por qué son importantes las direcciones de los devanados de un transformador?
4. Cierto transformador tiene un devanado primario con 500 vueltas y uno secundario con 250 vueltas. ¿Cuál es la relación de vueltas?

14–3 TRANSFORMADORES ELEVADORES Y REDUCTORES

Un transformador elevador tiene más vueltas en su devanado secundario que en el primario y se utiliza para incrementar voltaje de ca. Un transformador reductor tiene más vueltas en su devanado primario que en el secundario y se utiliza para reducir voltaje de ca.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir cómo elevan o reducen el voltaje los transformadores**
  - Explicar cómo funciona un transformador elevador
  - Identificar un transformador elevador por su relación de vueltas
  - Establecer la relación entre voltajes primario y secundario y la relación de vueltas
  - Explicar cómo funciona un transformador reductor
  - Identificar un transformador reductor por su relación de vueltas
  - Describir en qué consiste el aislamiento de cd

EL TRANSFORMADOR ELEVADOR

Un transformador donde el voltaje secundario es más grande que el voltaje primario se llama **transformador elevador**. La cantidad en que se eleva el voltaje depende de la relación de vueltas.

La relación del voltaje secundario (V_{sec}) al voltaje primario (V_{pri}) es igual a la relación del número de vueltas presente en el devanado secundario (N_{sec}) al número de vueltas que haya en el devanado primario (N_{pri}).

$$\frac{V_{sec}}{V_{pri}} = \frac{N_{sec}}{N_{pri}}$$

Ecuación 14–4

Recordemos que N_{sec}/N_{pri} define la relación de vueltas, n. Por consiguiente, a partir de esta relación

Ecuación 14–5

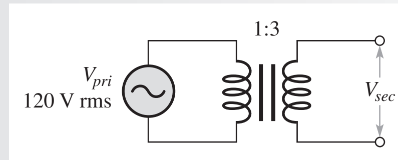
$$V_{sec} = nV_{pri}$$

La ecuación 14-5 muestra que el voltaje secundario es igual a la relación de vueltas multiplicada por el voltaje primario. Esta condición asume que el coeficiente de acoplamiento es de 1, y un buen transformador de núcleo de hierro se aproxima a este valor.

La relación de vueltas para un transformador elevador siempre es mayor a 1 debido a que el número de vueltas que hay en el devanado secundario (N_{sec}) siempre es más grande que el número de vueltas presente en el devanado primario (N_{pri}).

EJEMPLO 14–4 El transformador de la figura 14-10 tiene una relación de vueltas de 3. ¿Cuál es el voltaje en el devanado secundario?

▶ FIGURA 14–10



Solución El voltaje secundario es

$$V_{sec} = nV_{pri} = (3)120 \text{ V} = \mathbf{360\ V}$$

Observe que la relación de vueltas de 3 está señalada en el esquema como 1:3, lo cual indica que hay tres vueltas en el secundario por cada vuelta en el primario.

Problema relacionado El transformador de la figura 14-10 se cambia por uno que tiene una relación de vueltas de 4. Determine el V_{sec}.



Use el archivo Multisim E14-04 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

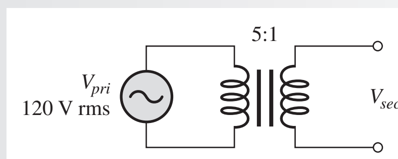
El transformador reductor

Un transformador donde el voltaje secundario es menor que el voltaje primario se llama **transformador reductor**. La cantidad en que se reduce el voltaje depende de la relación de vueltas. La ecuación 14-5 también es aplicable a un transformador reductor.

La relación de vueltas de un transformador reductor siempre es menor que 1 porque el número de vueltas en el devanado secundario siempre es menor que el número de vueltas en el devanado primario.

EJEMPLO 14–5 El transformador de la figura 14-11 tiene una relación de vueltas de 0.2. ¿Cuál es el voltaje secundario?

▶ FIGURA 14–11



Solución El voltaje secundario es

$$V_{sec} = nV_{pri} = (0.2)120 \text{ V} = \mathbf{24\ V}$$

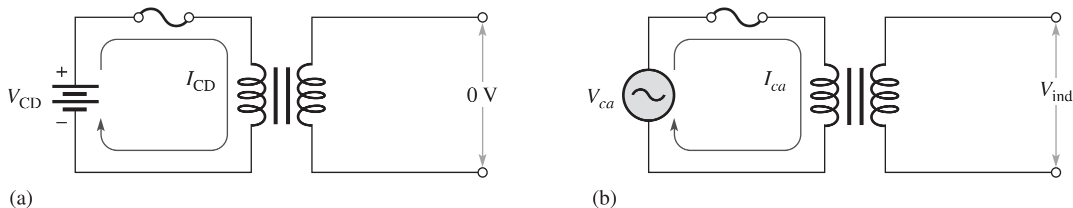
Problema relacionado El transformador de la figura 14-11 se cambia por uno que tiene una relación de vueltas de 0.48. Determine el voltaje secundario.



Use el archivo Multisim E14-05 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Aislamiento de cd

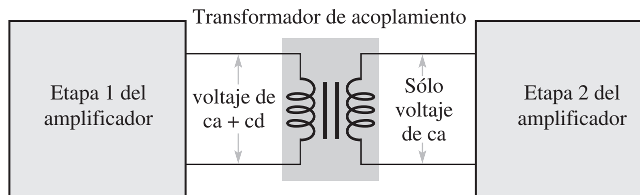
Tal como se ilustra en la figura 14-12(a), si a través del primario de un transformador fluye corriente directa, en el secundario no sucede nada. La razón es que se requiere de corriente variante en el tiempo en el devanado primario para inducir voltaje en el devanado secundario, como se muestra en la parte (b). Por consiguiente, el transformador aísla el circuito secundario de cualquier voltaje de cd presente en el circuito primario. Un transformador que se utiliza estrictamente para aislamiento tiene una relación de vueltas de 1.



▲ **FIGURA 14–12**

Aislamiento de cd y acoplamiento de ca.

En una aplicación típica de alta frecuencia, se puede utilizar un transformador pequeño para evitar que el voltaje de cd a la salida de una etapa del amplificador afecte la polarización de cd de la siguiente etapa del amplificador. Solamente la señal de ca se acopla a través del transformador de una etapa a la siguiente, como ilustra la figura 14-13.



▲ **FIGURA 14–13**

Etapas de amplificador con acoplamiento mediante transformador para aislamiento de cd.

REPASO DE LA SECCIÓN 14-3

1. ¿Qué hace un transformador elevador?
2. Si la relación de vueltas es de 5, ¿cuánto más grande es el voltaje secundario que el voltaje primario?
3. Cuando se aplican 240 V de ca al devanado primario de un transformador con una relación de vueltas de 10, ¿cuál es el voltaje secundario?
4. ¿Qué hace un transformador reductor?
5. Se aplica un voltaje de 120 V de ca al devanado primario de un transformador cuya relación de vueltas es de 0.5. ¿Cuál es el voltaje secundario?
6. Un voltaje primario de 120 V de ca se reduce a 12 V de ca. ¿Cuál es la relación de vueltas?
7. ¿Qué significa el término *aislamiento eléctrico*?

14–4 Carga del devanado secundario

Cuando se conecta una carga resistiva al devanado secundario de un transformador, la relación de la corriente de carga (secundario) y la corriente en el circuito primario se determina por relación de vueltas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

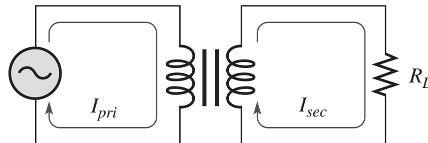
- **Analizar el efecto de una carga resistiva a través del devanado secundario**
  - Determinar la corriente suministrada por el secundario cuando se carga un transformador elevador
  - Determinar la corriente suministrada por el secundario cuando se carga un transformador reductor
  - Analizar la potencia en un transformador

Cuando se conecta un resistor de carga al devanado secundario, como ilustra la figura 14-14, fluye corriente a través del circuito secundario resultante a causa del voltaje inducido en la bobina secundaria. Es posible demostrar que la relación de la corriente primaria, I_{pri}, a la corriente secundaria, I_{sec}, es igual a la relación de vueltas, tal como expresa la siguiente ecuación:

Ecuación 14–6

$$\frac{I_{pri}}{I_{sec}} = n$$

▶ FIGURA 14–14



Una manipulación de los términos de la ecuación 14-6 resulta en la ecuación 14-7, la cual muestra que I_{sec} es igual a I_{pri} multiplicada por el recíproco de la relación de vueltas.

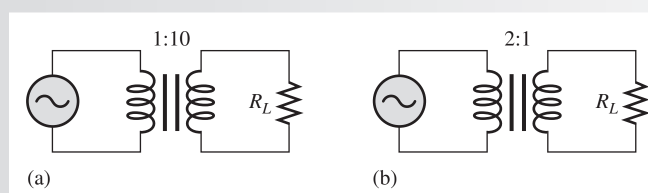
Ecuación 14–7

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri}$$

Por tanto, para un transformador elevador, donde n es mayor que 1, la corriente en el secundario es menor que en el primario. Para un transformador reductor, n es menor que 1 e I_{sec} es mayor que I_{pri}. Cuando el voltaje en el secundario es mayor que en el primario, la corriente en el secundario es menor que en el primario, y viceversa.

EJEMPLO 14–6 Los dos transformadores que aparecen en la figura 14-15 tienen devanados secundarios cargados. Si la corriente en el primario es de 100 mA en cada caso, ¿cuál es la corriente en la carga?

▶ FIGURA 14–15



Solución En la figura 14-15(a), la relación de vueltas es de 10. La corriente a través de la carga es

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} = (0.1)100\text{ mA} = \mathbf{10\ mA}$$

En la figura 14-15(b), la relación de vueltas es de 0.5. La corriente a través de la carga es

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} = (2)100\text{ mA} = \mathbf{200\ mA}$$

Problema relacionado ¿Cuál será la corriente en el secundario mostrado en la figura 14-15(a) si la relación de vueltas se duplica? ¿Cuál será la corriente en el secundario de la figura 14-15(b) si la relación de vueltas se reduce a la mitad? Suponga que I_{pri} no cambia en ambos circuitos.

La potencia en el primario es igual a la potencia en la carga

Cuando se conecta una carga al devanado secundario de un transformador, la potencia transferida a la carga nunca puede ser mayor que la potencia en el devanado primario. Para un transformador ideal, la potencia suministrada al primario es igual a la potencia suministrada por el secundario a la carga. Cuando se consideran las pérdidas, algo de potencia se disipa en el transformador en lugar de en la carga; por consiguiente, en la carga la potencia siempre es menor que en el primario.

La potencia depende del voltaje y de la corriente, y no puede haber incremento de potencia en un transformador. Por consiguiente, si el voltaje se eleva, la corriente se reduce, y viceversa. En un transformador ideal, la potencia en el secundario es igual a la potencia en el primario independientemente de la relación de vueltas, tal como indican las siguientes ecuaciones. La potencia suministrada al primario es

$$P_{pri} = V_{pri}I_{pri}$$

y la potencia suministrada a la carga es

$$P_{sec} = V_{sec}I_{sec}$$

De acuerdo con las ecuaciones 14-7 y 14-5,

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} \qquad \text{y} \qquad V_{sec} = nV_{pri}$$

Por sustitución,

$$P_{sec} = \left(\frac{1}{\cancel{n}}\right)\cancel{n}V_{pri}I_{pri}$$

Al eliminar términos se obtiene

$$P_{sec} = V_{pri}I_{pri} = P_{pri}$$

En la práctica los transformadores de potencia se acercan mucho a este resultado debido a sus muy altas eficiencias.

REPASO DE LA SECCIÓN 14-4

1. Si la relación de vueltas de un transformador es de 2, ¿la corriente en el secundario será mayor o menor que la corriente en el primario? ¿Por cuánto?
2. Un transformador tiene 1000 vueltas en su devanado primario, 250 vueltas en el devanado secundario, e I_{pri} es de 0.5 A. ¿Cuál es el valor de I_{sec}?
3. En el problema 2, ¿cuánta corriente se requiere en el primario para producir una corriente de 10 A en la carga?

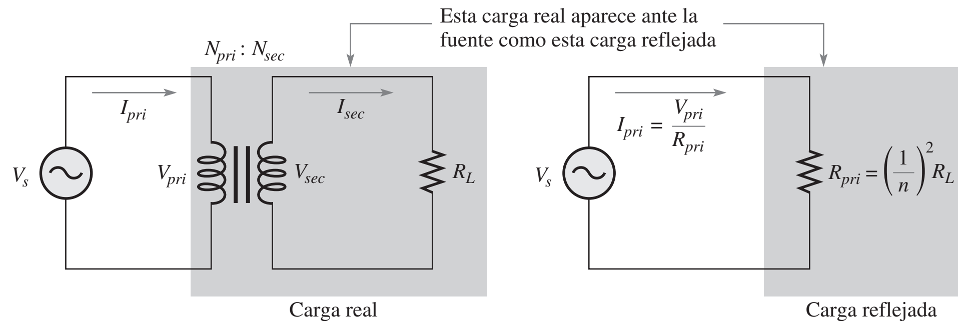
14–5 CARGA REFLEJADA

Desde el punto de vista del primario, una carga conectada a través del devanado secundario de un transformador parece tener una resistencia que no es necesariamente igual a la resistencia real de la carga. La carga real se "refleja" en el lado primario conforme lo determina la relación de vueltas. Esta carga reflejada es lo que la fuente primaria ve efectivamente, y determina la cantidad de corriente en el primario.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar el concepto de carga reflejada en un transformador**
  - Definir el término *resistencia reflejada*
  - Explicar cómo afecta la relación de vueltas a la resistencia reflejada
  - Calcular la resistencia reflejada

El concepto de **carga reflejada** se ilustra en la figura 14-16. La carga (R_L) en el secundario de un transformador se refleja en el primario a causa de la acción del transformador. La carga aparece ante la fuente en el primario como si fuera una resistencia (R_{pri}) con un valor determinado por la relación de vueltas y el valor real de resistencia de la carga. La resistencia R_{pri} se llama **resistencia reflejada.**



▲ **FIGURA 14–16**

Carga reflejada en un circuito de transformador.

En el primario de la figura 14-16, la resistencia es $R_{pri} = V_{pri}/I_{pri}$. La resistencia en el secundario es $R_L = V_{sec}/I_{sec}$. De acuerdo con las ecuaciones 14-4 y 14-6, se sabe que $V_{sec}/V_{pri} = n$ y $I_{pri}/I_{sec} = n$. Con estas relaciones, se determina una fórmula para R_{pri} en función de R_L como sigue:

$$\frac{R_{pri}}{R_L} = \frac{V_{pri}/I_{pri}}{V_{sec}/I_{sec}} = \left(\frac{V_{pri}}{V_{sec}}\right)\left(\frac{I_{sec}}{I_{pri}}\right) = \left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{1}{n}\right) = \left(\frac{1}{n}\right)^2$$

Al resolver para R_{pri} se obtiene

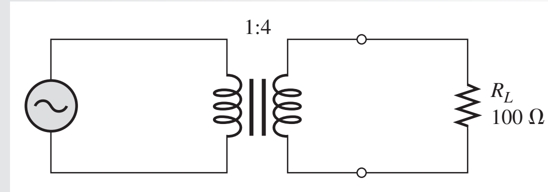
Ecuación 14–8

$$R_{pri} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L$$

La ecuación 14-8 muestra que la resistencia reflejada en el circuito primario es el cuadrado del recíproco de la relación de vueltas multiplicado por la resistencia de la carga.

EJEMPLO 14–7 La figura 14-17 muestra una fuente acoplada por un transformador a un resistor de carga de 100 Ω. El transformador tiene una relación de vueltas de 4. ¿Cuál es la resistencia reflejada vista por la fuente?

▶ **FIGURA 14–17**

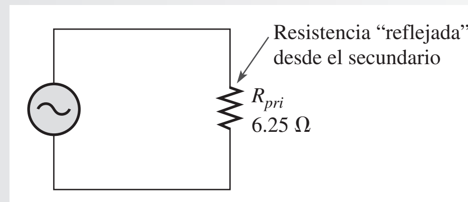


Solución La resistencia reflejada se determina con la ecuación 14-8.

$$R_{pri} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L = \left(\frac{1}{4}\right)^2 R_L = \left(\frac{1}{16}\right)100\ \Omega = \mathbf{6.25\ \Omega}$$

La fuente ve una resistencia de 6.25 Ω justo como si estuviera conectada directamente, ello se muestra en el circuito equivalente de la figura 14-18.

▶ **FIGURA 14–18**



Problema relacionado Si en la figura 14-17 la relación de vueltas es de 10 y R_L es de 600 Ω, ¿cuál es la resistencia reflejada?

EJEMPLO 14–8 En la figura 14-17, si se utiliza un transformador con relación de vueltas de 0.25, ¿cuál es la resistencia reflejada?

Solución La resistencia reflejada es

$$R_{pri} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L = \left(\frac{1}{0.25}\right)^2 100\ \Omega = (4)^2 100\ \Omega = \mathbf{1600\ \Omega}$$

Este resultado ilustra la diferencia que produce la relación de vueltas.

Problema relacionado Para lograr un resistencia reflejada de 800 Ω, ¿qué relación de vueltas se requiere en la figura 14-17?

En un transformador elevador ($n > 1$), la resistencia reflejada es menor que la resistencia real de la carga; en un transformador reductor ($n < 1$), la resistencia reflejada es mayor que la resistencia de la carga. Esto se ilustró en los ejemplos 14-7 y 14-8, respectivamente.

REPASO DE LA SECCIÓN 14-5

1. Defina el término *resistencia reflejada*.
2. ¿Qué característica de transformador determina la resistencia reflejada?
3. Cierto transformador tiene una relación de vueltas de 10 y la carga es de 50 Ω. ¿Cuánta resistencia se refleja en el primario?
4. ¿Cuál es la relación de vueltas requerida para reflejar una resistencia de carga de 4 Ω en el primario como si fuese de 400 Ω?

14–6 IGUALACIÓN DE IMPEDANCIA

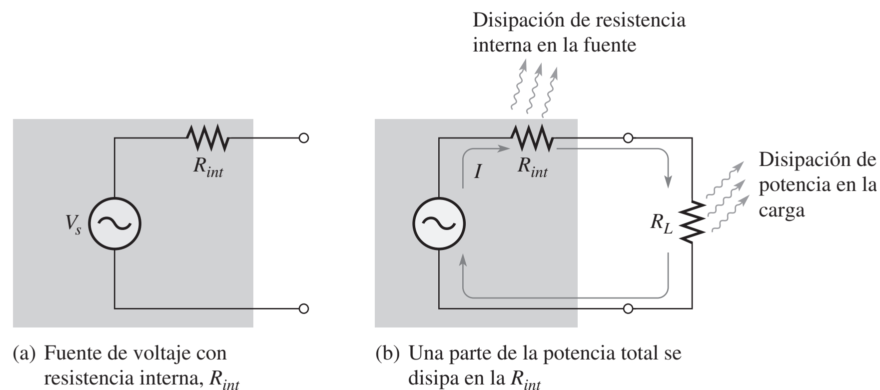
Una aplicación de los transformadores se encuentra en la igualación de una resistencia de carga frente a una resistencia de fuente para lograr una transferencia de potencia máxima. Esta técnica se llama igualación de impedancia. Recuerde que el teorema de transferencia de potencia máxima se estudió en el capítulo 8. En sistemas de audio, a menudo se utilizan transformadores igualadores de impedancia para conseguir la cantidad máxima de potencia disponible del amplificador al altavoz.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar la igualación de impedancia con transformadores**
  - Enunciar una definición general de impedancia
  - Definir el término *igualación de impedancia*
  - Explicar el propósito de la igualación de impedancia
  - Describir una aplicación práctica

Impedancia es la oposición a la corriente, incluidos los efectos combinados tanto de resistencia como de reactancia. En este capítulo el tratamiento se confinará sólo a la resistencia.

El concepto de transferencia de potencia se ilustra en el circuito básico de la figura 14-19. La parte (a) muestra una fuente de voltaje de ca con un resistor dispuesto en serie que representa su resistencia interna. Algo de resistencia interna fija siempre está presente en todas las fuentes debido a sus circuitos internos o a su configuración física. Cuando la fuente se conecta directamente a una carga, como ilustra la parte (b), por regla general, el objetivo es transferir tanta potencia producida por la fuente a la carga como sea posible. Sin embargo, cierta cantidad de la potencia producida por la fuente se disipa en su resistencia interna y la potencia restante se va a la carga.

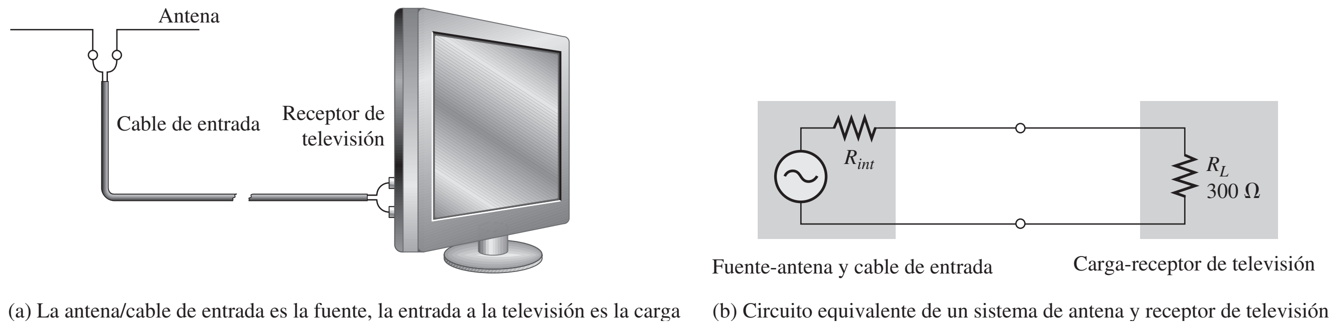


▲ FIGURA 14–19

Transferencia de potencia desde una fuente de voltaje no ideal hacia una carga.

En la mayoría de las situaciones prácticas, la resistencia interna de varios tipos de fuentes es fija. Asimismo, en muchos casos, la resistencia de un dispositivo que actúa como carga es fija y no puede ser alterada. Si usted tiene que conectar una fuente dada a una carga dada, recuerde que sólo por casualidad sus resistencias resultarán iguales. En esta situación, un tipo especial de transformador de banda ancha resulta muy útil. Se puede utilizar la característica de resistencia reflejada provista por un transformador para hacer que la resistencia de la carga parezca tener el mismo valor que la resistencia de la fuente. Esta técnica se denomina **igualación de impedancia**, y el transformador se llama transformador de igualación de impedancia porque también transforma reactancias tanto como resistencias.

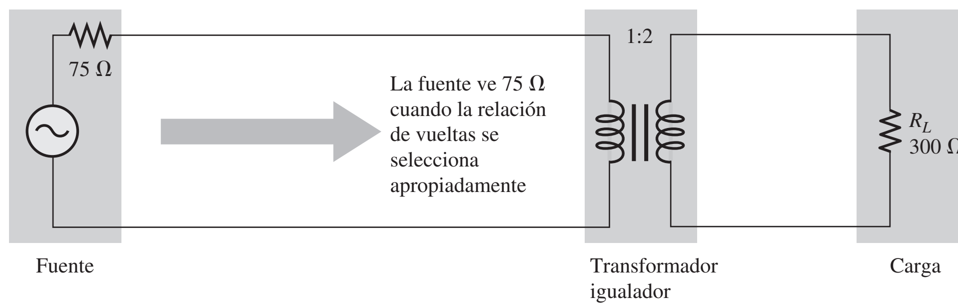
Consideremos una situación práctica de todos los días para ilustrar el concepto de igualación de impedancia. Suponga que la resistencia de entrada de un receptor de televisión es de 300 Ω. Se debe conectar una antena a esta entrada mediante un cable para recibir señales de televisión. En este caso, la antena y el cable de entrada actúan como fuente, y la resistencia de entrada del receptor de televisión es la carga, como ilustra la figura 14-20.



▲ **FIGURA 14–20**

Antena acoplada directamente a un receptor de televisión.

Es común que un sistema de antena tenga una impedancia característica de 75 Ω. Esto significa que la antena y el cable de entrada aparecen como una fuente de 75 Ω. Por tanto, si la fuente de 75 Ω (antena y cable de entrada) se conecta directamente a la entrada de la televisión de 300 Ω, no se suministrará potencia máxima a la entrada de este receptor y se tendrá una recepción pobre de la señal. La solución es utilizar un transformador de impedancia, conectado como se indica en la figura 14-21, para igualar la resistencia de carga de 300 Ω a la resistencia de 75 Ω de la fuente.



▲ **FIGURA 14–21**

Ejemplo de una carga igualada a una fuente por un transformador de acoplamiento para transferencia de potencia máxima.

Para igualar las resistencias, es decir, para reflejar la resistencia de carga (R_L) en el circuito primario de modo que parezca tener un valor igual a la resistencia interna de la fuente (R_{int}), se debe elegir un valor apropiado de relación de vueltas (n). Se desea que la carga de 300 Ω parezca ser de 75 Ω ante la fuente. Es posible utilizar la ecuación 14-8 para determinar una fórmula para la relación de vueltas, n, cuando se conocen los valores de R_L y R_{pri}, la resistencia reflejada, como sigue:

$$R_{pri} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L$$

Deben transponerse los términos y dividirse ambos miembros entre R_L.

$$\left(\frac{1}{n}\right)^2 = \frac{R_{pri}}{R_L}$$

Se toma la raíz cuadrada de ambos miembros,

$$\frac{1}{n} = \sqrt{\frac{R_{pri}}{R_L}}$$

Se invierten ambos miembros para obtener la siguiente fórmula para la relación de vueltas:

Equation 14–9

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}}$$

Por último, se resuelve para esta relación de vueltas en particular.

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} = \sqrt{\frac{300\ \Omega}{75\ \Omega}} = \sqrt{4} = 2$$

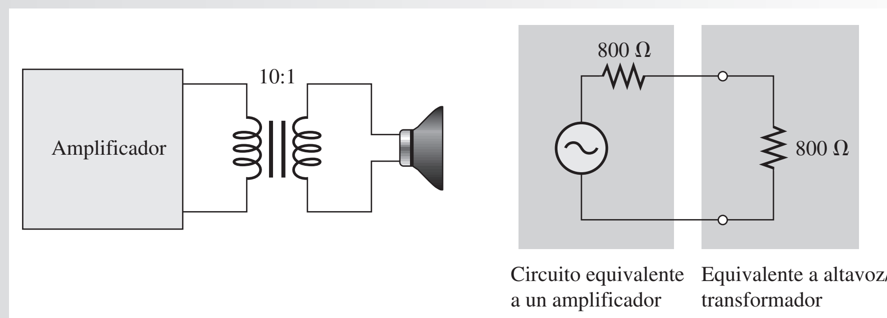
Por consiguiente, en esta aplicación se debe utilizar un transformador igualador con una relación de vueltas de 2.

EJEMPLO 14–9 Cierto amplificador tiene una resistencia interna de 800 Ω vista desde su salida. Para proporcionar potencia máxima a un altavoz de 8 Ω, ¿qué relación de vueltas se debe utilizar en el transformador de acoplamiento?

Solución La resistencia reflejada debe ser igual a 800 Ω. Por tanto, es posible determinar la relación de vueltas aplicando la ecuación 14-9,

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} = \sqrt{\frac{8\ \Omega}{800\ \Omega}} = \sqrt{0.01} = \mathbf{0.1}$$

Debe haber diez vueltas en el primario por cada vuelta en el secundario. El diagrama y su circuito reflejado equivalente se muestran en la figura 14-22.



▲ **FIGURA 14–22**

Problema relacionado Para proporcionar potencia máxima a dos altavoces de 8 Ω dispuestos en paralelo, ¿cuál debe ser la relación de vueltas en la figura 14-22?

REPASO DE LA SECCIÓN 14-6

1. ¿Qué significa el concepto de igualación de impedancia?
2. ¿Cuál es la ventaja de igualar la resistencia de la carga a la resistencia de una fuente?
3. Un transformador tiene una relación de vueltas de 0.5. ¿Cuál es la resistencia reflejada con 100 Ω en el devanado secundario?

14–7 CARACTERÍSTICAS DE UN TRANSFORMADOR NO IDEAL (TRANSFORMADOR REAL)

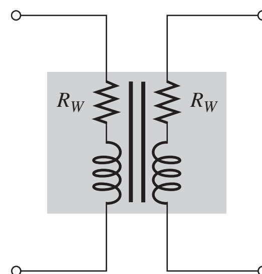
La operación de un transformador fue analizada desde un punto de vista ideal. Es decir, la resistencia de devanado, la capacitancia de devanado, y las características no ideales del núcleo se omitieron y el transformador fue tratado como si su eficiencia fuera del 100%. Para estudiar los conceptos básicos y en muchas aplicaciones, el modelo ideal es válido. Sin embargo, el transformador práctico tiene varias características no ideales.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir un transformador no ideal**
  - Enumerar y describir las características no ideales
  - Explicar que es la potencia nominal de un transformador
  - Definir la *eficiencia* de un transformador

Resistencia de devanado

Tanto el devanado primario como el secundario de un transformador práctico tienen resistencia de devanado. Usted ya estudió acerca de la resistencia de devanado de inductores en el capítulo 13. Las resistencias de devanado de un transformador práctico se representan como resistores en serie con los devanados dispuestos como indica la figura 14-23.



◄ **FIGURA 14–23**

Resistencias de devanado en un transformador práctico.

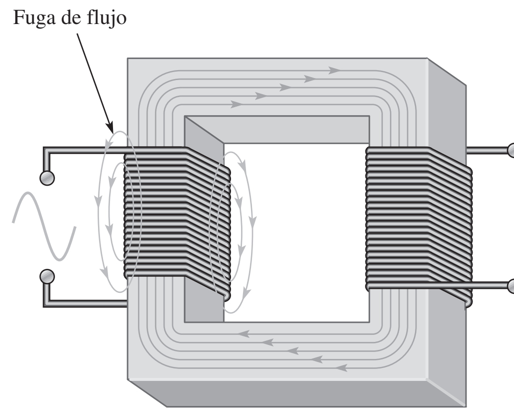
En un transformador práctico, la resistencia de devanado resulta en menos voltaje a través de una carga secundaria. Las caídas de voltaje provocadas por la resistencia de devanado se sustraen efectivamente de los voltajes primario y secundario, y producen un voltaje de carga que es menor al pronosticado por la relación $V_{sec} = nV_{pri}$. En muchos casos, el efecto es relativamente pequeño y puede ser omitido.

Pérdidas en el núcleo

Siempre hay algo de conversión de energía en el material del núcleo de un transformador práctico. Esta conversión aparece como calentamiento de los núcleos de ferrita y hierro, pero no ocurre en núcleos de aire. Una parte de esta conversión de energía tiene lugar a causa de la inversión continua del campo magnético provocada por la dirección cambiante de la corriente en el primario; este componente de la conversión de energía se conoce como *pérdida por histéresis*. El resto de la conversión de energía en calor se debe a corrientes parásitas producidas cuando se induce voltaje en el material del núcleo mediante el flujo magnético cambiante, de acuerdo con la ley de Faraday. Las corrientes parásitas se presentan en patrones circulares en la resistencia del núcleo, por lo que se produce calor. Esta conversión en calor se reduce en gran medida con el uso de una construcción laminada de los núcleos de hierro. Las delgadas capas de material electromagnético están aisladas entre sí para reducir al mínimo la acumulación de corrientes parásitas, al confinarlas en una pequeña área, y para mantener las pérdidas en el núcleo a un mínimo.

Dispersión del flujo magnético

En un transformador ideal, se supone que todo el flujo magnético producido por la corriente primaria pasa por el núcleo hacia el devanado secundario, y viceversa. En un transformador práctico, algunas de las líneas de flujo magnético se escapan del núcleo y pasan a través del aire circundante de regreso al otro extremo del devanado, tal como ilustra la figura 14-24 para el campo magnético producido por la corriente primaria. La dispersión del flujo magnético da por resultado un voltaje secundario reducido.



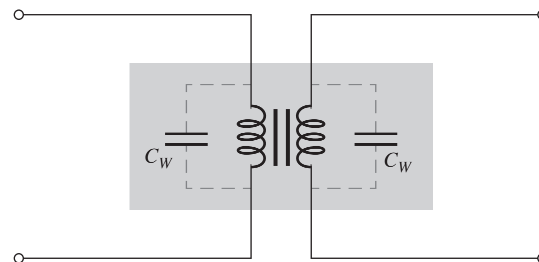
▶ **FIGURA 14–24**

Fuga de flujo en un transformador práctico.

El porcentaje de flujo magnético que llega en realidad al devanado secundario determina el coeficiente de acoplamiento del transformador. Por ejemplo, si nueve de cada diez líneas de flujo permanecen dentro del núcleo, el coeficiente de acoplamiento es de 0.90, o del 90%. La mayoría de los transformadores de núcleo de hierro tiene coeficientes de acoplamiento muy altos (mayores a 0.99), en tanto que los de núcleo de ferrita y núcleo de aire tienen valores más bajos.

Capacitancia de devanado

Tal como se aprendió en el capítulo 13, siempre hay alguna capacitancia parásita entre las vueltas adyacentes de un devanado. Estas capacitancias parásitas producen una capacitancia efectiva en paralelo con cada devanado de un transformador, como indica la figura 14-25.



▶ **FIGURA 14–25**

Capacitancia de devanado en un transformador práctico.

Las capacitancias parásitas tienen muy poco efecto en la operación del transformador a bajas frecuencias (tal como a frecuencias de línea de potencia) porque las reactancias (X_C) son muy altas. Sin embargo, a frecuencias más altas, las reactancias disminuyen y comienzan a producir un efecto de desvío a través del devanado primario y de la carga secundaria. Por consiguiente, menos de la corriente primaria total pasa por el devanado primario, y menos de la corriente secundaria total pasa a través de la carga. Este efecto reduce el voltaje en la carga conforme se eleva la frecuencia.

Potencia nominal de un transformador

Un transformador de potencia, por lo general, se clasifica en volt-amperes (VA), voltaje primario/secundario, y frecuencia de operación. Por ejemplo, una clasificación de transformador dada puede especificarse como de 2 kVA, 500/50, 60 Hz. El valor de 2 kVA es la **potencia nominal aparente**. Las cifras 500 y 50 pueden representar voltajes secundarios o primarios. Los 60 Hz son la frecuencia de operación.

La clasificación de un transformador puede resultar muy útil al seleccionar el transformador apropiado para una aplicación dada. Suponga, por ejemplo, que 50 V son el voltaje secundario. En este caso, la corriente a través de la carga es

$$I_L = \frac{P_{sec}}{V_{sec}} = \frac{2\text{ kVA}}{50\text{ V}} = 40\text{ A}$$

Por otra parte, si 500 V son el voltaje secundario, entonces

$$I_L = \frac{P_{sec}}{V_{sec}} = \frac{2\text{ kVA}}{500\text{ V}} = 4\text{ A}$$

Estas son las corrientes máximas que el secundario puede manejar en uno u otro caso.

La razón por la que la potencia nominal está en volt-amperes (potencia aparente) y no en watts (potencia real o activa) es la siguiente: si en el transformador la carga es puramente capacitiva o puramente inductiva, la potencia real (watts) suministrada a la carga es de cero. Sin embargo, la corriente para $V_{sec} = 500$ V y $X_C = 100\ \Omega$ a 60 Hz, por ejemplo, es de 5 A. Esta corriente sobrepasa la máxima que el secundario de 2 kVA puede manejar, y el transformador está en riesgo de sufrir averías. Por lo que no tiene sentido especificar la potencia en watts.

Eficiencia de un transformador

Recordemos que, en un transformador ideal, la potencia suministrada a la carga es igual a la potencia suministrada al primario. Como las características no ideales que se acaban de analizar provocan pérdida de potencia en el transformador, la potencia secundaria (salida) siempre es menor que la potencia en el primario (entrada). La **eficiencia** (η) de un transformador mide el porcentaje de la potencia de entrada que se suministra a la salida.

$$\eta = \left(\frac{P_{sal}}{P_{ent}}\right)100\%$$

Ecuación 14–10

La mayoría de los transformadores de potencia tiene eficiencias de más del 95% bajo carga.

EJEMPLO 14–10 Cierto tipo de transformador tiene una corriente primaria de 5 A y voltaje primario de 4800 V. La corriente secundaria es de 90 A y el voltaje secundario de 240 V. Determine la eficiencia de este transformador.

Solución La potencia de entrada es

$$P_{ent} = V_{pri}I_{pri} = (4800\text{ V})(5\text{ A}) = 24\text{ kVA}$$

La potencia de salida es

$$P_{sal} = V_{sec}I_{sec} = (240\text{ V})(90\text{ A}) = 21.6\text{ kVA}$$

La eficiencia es

$$\eta = \left(\frac{P_{sal}}{P_{ent}}\right)100\% = \left(\frac{21.6\text{ kVA}}{24\text{ kVA}}\right)100\% = \mathbf{90\%}$$

Problema relacionado Un transformador tiene corriente primaria de 8 A con voltaje primario de 440 V. La corriente secundaria es de 30 A y el voltaje secundario de 100 V. ¿Cuál es la eficiencia?

REPASO DE LA SECCIÓN 14-7

1. Explique cómo difiere un transformador práctico del modelo ideal.
2. El coeficiente de acoplamiento de cierto transformador es de 0.85. ¿Qué significa esto?
3. Cierto transformador tiene una potencia nominal de 10 kVA. Si el voltaje secundario es de 250 V, ¿cuánta corriente de carga puede manejar el transformador?

14–8 TRANSFORMADORES CON TOMAS Y DEVANADOS MÚLTIPLES

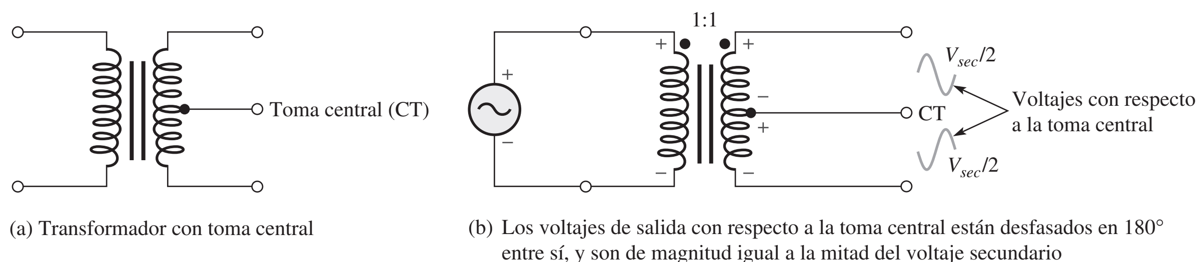
El transformador básico tiene distintas variaciones importantes. Éstas incluyen transformadores con tomas, transformadores con múltiples devanados, y autotransformadores.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir distintos tipos de transformadores**
  - Describir los transformadores con toma central
  - Describir los transformadores con múltiples devanados
  - Describir los autotransformadores

Transformadores con tomas

En la figura 14-26(a) se muestra el diagrama de un transformador con devanado secundario y toma central. La **toma central** (**CT,** por sus siglas en inglés) equivale a dos devanados secundarios con la mitad del voltaje total a través de cada uno.



(a) Transformador con toma central

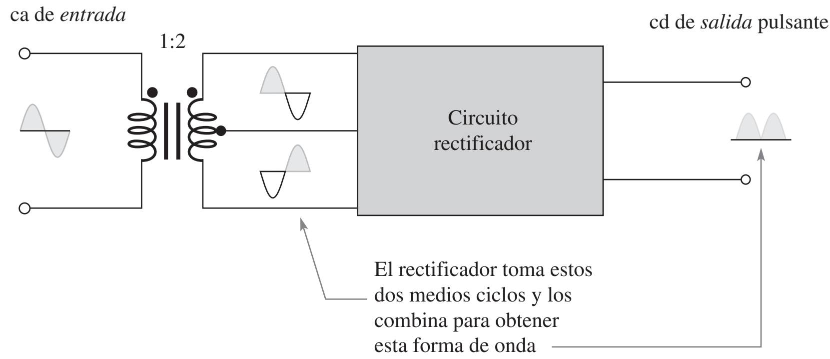
(b) Los voltajes de salida con respecto a la toma central están desfasados en 180° entre sí, y son de magnitud igual a la mitad del voltaje secundario

▲ **FIGURA 14–26**

Operación de un transformador con toma central.

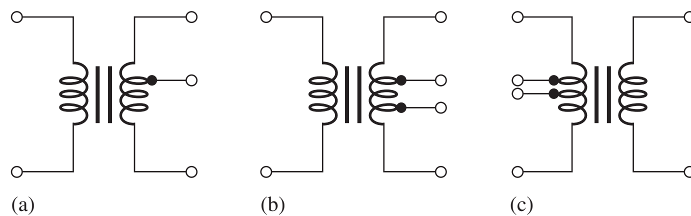
Los voltajes entre uno u otro extremo del devanado secundario y la toma central son, en cualquier instante, iguales en magnitud pero opuestos en polaridad, como ilustra la figura 14-26(b). Aquí, por ejemplo, en algún instante en el voltaje sinusoidal, la polaridad a través de todo el devanado secundario es como se muestra (extremo superior +, inferior −). En la toma central, el voltaje es menos positivo que en el extremo superior, pero más positivo que en el extremo inferior del secundario. Por consiguiente, medido con respecto a la toma central, el extremo superior del secundario es positivo y el inferior es negativo. Esta configuración de toma central se utiliza en muchos rectificadores de fuente de potencia donde el voltaje de ca se transforma en cd, tal como vemos en la figura 14-27.

Algunos transformadores tienen tomas en el devanado secundario en puntos diferentes del centro eléctrico. Asimismo, en ocasiones se utilizan tomas únicas y múltiples en el primario y el secundario para ciertas aplicaciones, tales como transformadores igualadores de impedancia que normalmente tienen un primario con toma central. En la figura 14-28 se muestran algunos ejemplos de estos tipos de transformadores.



▲ **FIGURA 14–27**

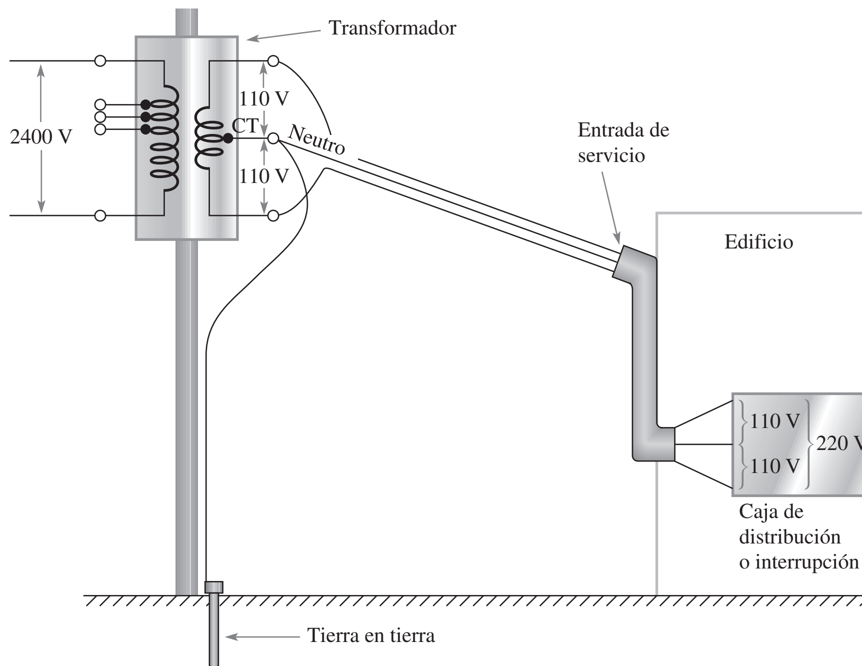
Aplicación de un transformador con toma central en la conversión de ca a cd.



▲ **FIGURA 14–28**

Transformadores con tomas.

Un ejemplo de un transformador con tomas múltiples en el devanado primario y una toma central en el devanado secundario es el transformador instalado en un poste en la vía pública, y que se utiliza por las compañías de electricidad para reducir el alto voltaje de la línea de potencia a 110 V/220 V y proporcionar el servicio a clientes residenciales y comerciales, como ilustra la figura 14-29. Las tomas múltiples en el devanado primario se utilizan para efectuar ajustes menores de la relación de vueltas y vencer los voltajes de línea que están ligeramente altos o ligeramente bajos.

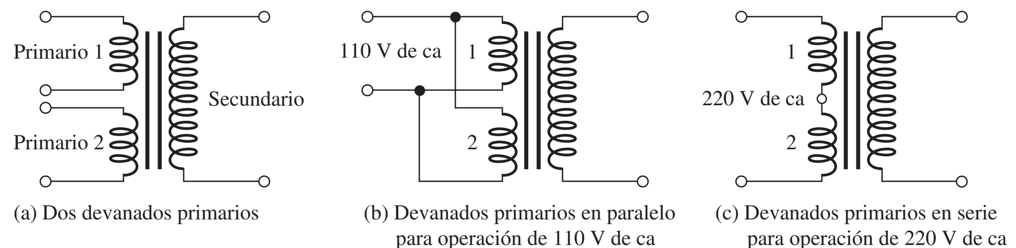


◀ **FIGURA 14–29**

Transformador instalado en un poste en un sistema de distribución de energía típico.

Transformadores con múltiples devanados

Algunos transformadores están diseñados para operar con líneas de 110 o 220 V de ca. Estos transformadores, en general, tienen dos devanados primarios, cada uno de los cuales está diseñado para 110 V de ca. Cuando los dos devanados están conectados en serie, el transformador se puede utilizar para operación de 220 V de ca, como ilustra la figura 14-30.



▲ **FIGURA 14–30**

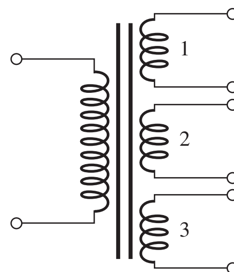
Transformadores con múltiples primarios.

Más de un secundario puede ser enrollado sobre un núcleo común. A menudo se utilizan transformadores con varios devanados secundarios para lograr diversos voltajes elevando o reduciendo el voltaje primario. Estos tipos se utilizan comúnmente en aplicaciones de fuente de potencia donde se requieren varios niveles de voltaje para la operación de un instrumento electrónico.

En la figura 14-31 se muestra un diagrama típico de un transformador con múltiples secundarios; este transformador tiene tres secundarios. Ocasionalmente se encontrarán en una unidad combinaciones de transformadores con múltiples primarios, múltiples secundarios, y con tomas.

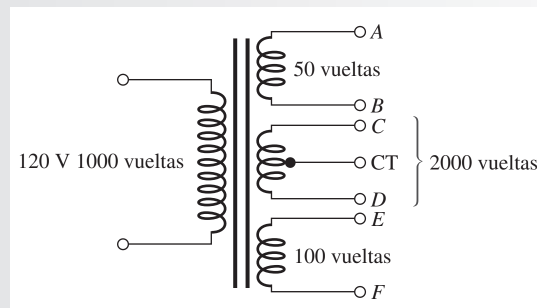
▶ **FIGURA 14–31**

Transformador con múltiples secundarios.



EJEMPLO 14–11 El transformador mostrado en la figura 14-32 tiene la cantidad de vueltas indicada. Uno de los secundarios también tiene una toma central. Si se conectan 120 V de ca al primario, determine cada voltaje secundario y los voltajes con respecto a la toma central (CT) en el secundario de en medio.

▶ **FIGURA 14–32**



Solución

$$V_{AB} = n_{AB}V_{pri} = (0.05)120\text{ V} = \mathbf{6\ V}$$
$$V_{CD} = n_{CD}V_{pri} = (2)120\text{ V} = \mathbf{240\ V}$$
$$V_{(CT)C} = V_{(CT)D} = \frac{240\text{ V}}{2} = \mathbf{120\ V}$$
$$V_{EF} = n_{EF}V_{pri} = (0.1)120\text{ V} = \mathbf{12\ V}$$

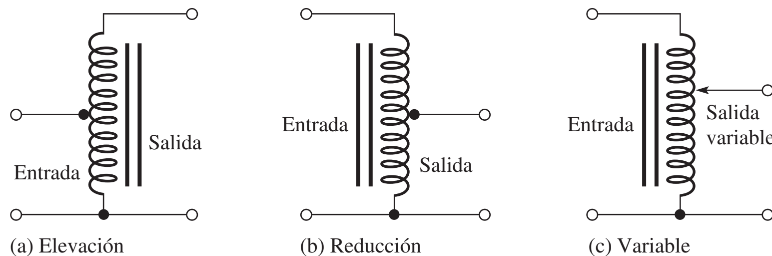
Problema relacionado Repita los cálculos para un primario con 500 vueltas.

Autotransformadores

En un **autotransformador**, un devanado sirve como primario y como secundario. El devanado tiene tomas en los puntos apropiados para lograr la relación de vueltas deseada y elevar o reducir el voltaje.

Los autotransformadores difieren de los transformadores convencionales en que no existe aislamiento eléctrico entre el primario y el secundario, porque ambos se encuentran en un solo devanado. Los autotransformadores normalmente son más pequeños y livianos que los transformadores convencionales equivalentes, ya que requieren un valor de kVA mucho más bajo para una carga dada. Muchos autotransformadores tienen una toma ajustable que utiliza un mecanismo de contacto deslizante de modo que el voltaje de salida pueda ser variado (éstos a menudo se llaman *variacs*). La figura 14-33 muestra símbolos esquemáticos para varios tipos de autotransformadores. Éstos se utilizan para arrancar motores de inducción industriales y para regular voltajes de líneas de transmisión.

El ejemplo 14-12 ilustra por qué un autotransformador tiene un requerimiento de kVA menor que los kVA de entrada o salida.



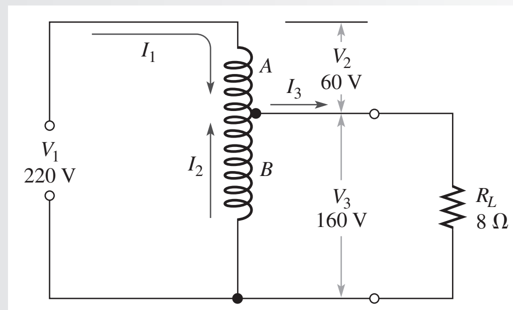
◀ **FIGURA 14–33**

Tipos de autotransformadores.

EJEMPLO 14–12 Cierto transformador se utiliza para cambiar una fuente de voltaje de 220 V a un voltaje de carga de 160 V entre las terminales de una resistencia de 8 Ω. Determine la potencia de entrada y salida en kilovolt-amperes y compruebe si el requerimiento de los kVA reales es menor que este valor. Suponga que este transformador es ideal.

Solución El circuito se muestra en la figura 14-34 indicando los voltajes y las corrientes.

▶ **FIGURA 14–34**



La corriente de carga, I_3, se determina como

$$I_3 = \frac{V_3}{R_L} = \frac{160\text{ V}}{8\ \Omega} = 20\text{ A}$$

La potencia de entrada es el voltaje de fuente total (V_1) multiplicado por la corriente total proveniente de la fuente (I_1).

$$P_{ent} = V_1 I_1$$

La potencia de salida es el voltaje de carga, V_3, multiplicado por la corriente de carga, I_3.

$$P_{sal} = V_3 I_3$$

Para un transformador ideal, $P_{ent} = P_{sal}$; por tanto,

$$V_1 I_1 = V_3 I_3$$

Al resolver para I_1 se obtiene

$$I_1 = \frac{V_3 I_3}{V_1} = \frac{(160\text{ V})(20\text{ A})}{220\text{ V}} = 14.55\text{ A}$$

Al aplicar la ley de la corriente de Kirchhoff en la toma,

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Al resolver para I_2, que es la corriente a través del devanado B, se obtiene

$$I_2 = I_1 - I_3 = 14.55\text{ A} - 20\text{ A} = -5.45\text{ A}$$

El signo menos indica que I_2 está desfasada con respecto a I_1.

Las potencias de entrada y salida son

$$P_{ent} = P_{sal} = V_3 I_3 = (160\text{ V})(20\text{ A}) = \mathbf{3.2\ kVA}$$

La potencia en el devanado A es

$$P_A = V_2 I_1 = (60\text{ V})(14.55\text{ A}) = 873\text{ VA} = 0.873\text{ kVA}$$

La potencia en el devanado B es

$$P_B = V_3 I_2 = (160\text{ V})(5.45\text{ A}) = 872\text{ VA} = 0.872\text{ kVA}$$

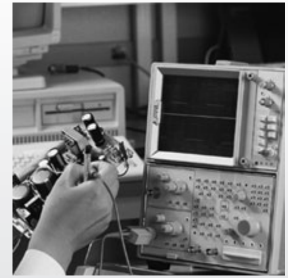
Por tanto, la potencia nominal requerida en cada devanado es menor que la potencia suministrada a la carga. La leve diferencia en las potencias calculadas en los devanados A y B se debe al redondeo.

Problema relacionado ¿Qué le sucede al requerimiento de kVA si la carga cambia a 4 Ω?

REPASO DE LA SECCIÓN 14-8

1. Cierto transformador tiene dos devanados secundarios. La relación de vueltas del devanado primario al primer secundario es de 10. La relación de vueltas del primario al secundario es de 0.2. Si se aplican 240 V de ca al primario, ¿cuáles son los voltajes secundarios?
2. Enuncie una ventaja y una desventaja de un autotransformador sobre un transformador convencional.

14–9 LOCALIZACIÓN DE FALLAS



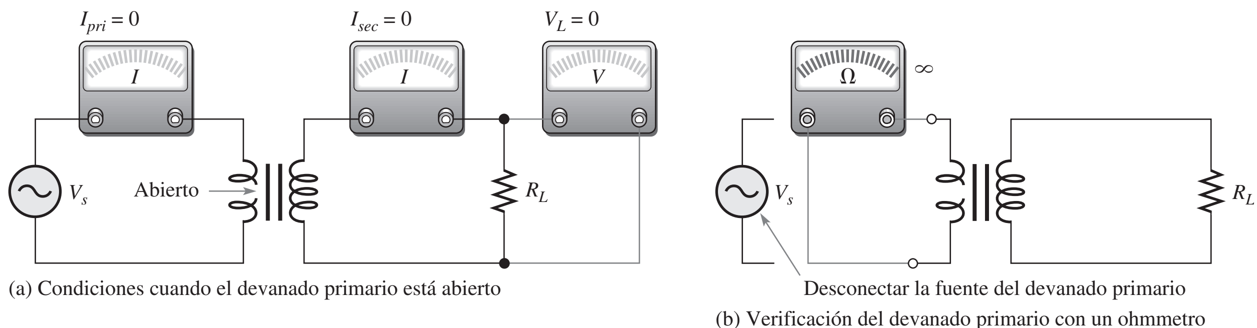
Los transformadores son dispositivos confiables cuando operan dentro de su rango especificado. Fallas comunes en transformadores son aberturas en el devanado primario o en el secundario. Una causa de semejantes fallas es la operación del dispositivo en condiciones que sobrepasan sus parámetros. Normalmente, cuando falla un transformador, es difícil de reparar y, por consiguiente, el procedimiento más simple es reemplazarlo. Algunas fallas de transformador y los síntomas asociados se abordan en esta sección.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Localizar fallas en transformadores**
  - Determinar un devanado primario o secundario abierto
  - Encontrar un devanado primario o secundario en cortocircuito o parcialmente en cortocircuito

Devanado primario abierto

Cuando existe un devanado primario abierto, no hay corriente primaria y, por tanto, no se induce voltaje o corriente en el secundario. Esta condición se ilustra en la figura 14-35(a), y el método de verificación con un ohmmetro aparece en la parte (b).



▲ **FIGURA 14–35**

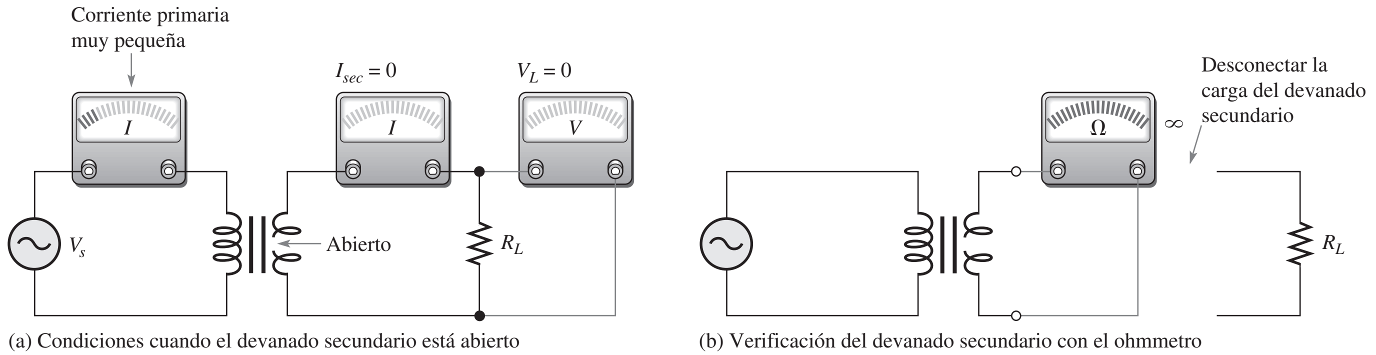
Devanado primario abierto.

Devanado secundario abierto

Cuando hay un devanado secundario abierto, no existe corriente en el circuito secundario y, por tanto, no hay voltaje en la carga. Asimismo, un secundario abierto propicia que la corriente primaria sea muy pequeña (sólo hay una pequeña corriente magnetizante). De hecho, la corriente primaria puede ser prácticamente cero. Esta condición se ilustra en la figura 14-36(a), y la verificación con un ohmmetro aparece en la parte (b).

Devanados en cortocircuito o parcialmente en cortocircuito

Los devanados en cortocircuito son muy raros y si ocurren resultan muy difíciles de localizar, a menos que exista un indicación visual o que un gran número de devanados esté en cortocircuito. Un devanado primario completamente en cortocircuito extraerá demasiada corriente de la fuente; y a menos que haya un cortacircuito o un fusible en el circuito, la fuente o el transformador, o ambos, se quemarán. Un corto parcial en el devanado primario puede provocar una corriente primaria más alta que lo normal o incluso excesiva.

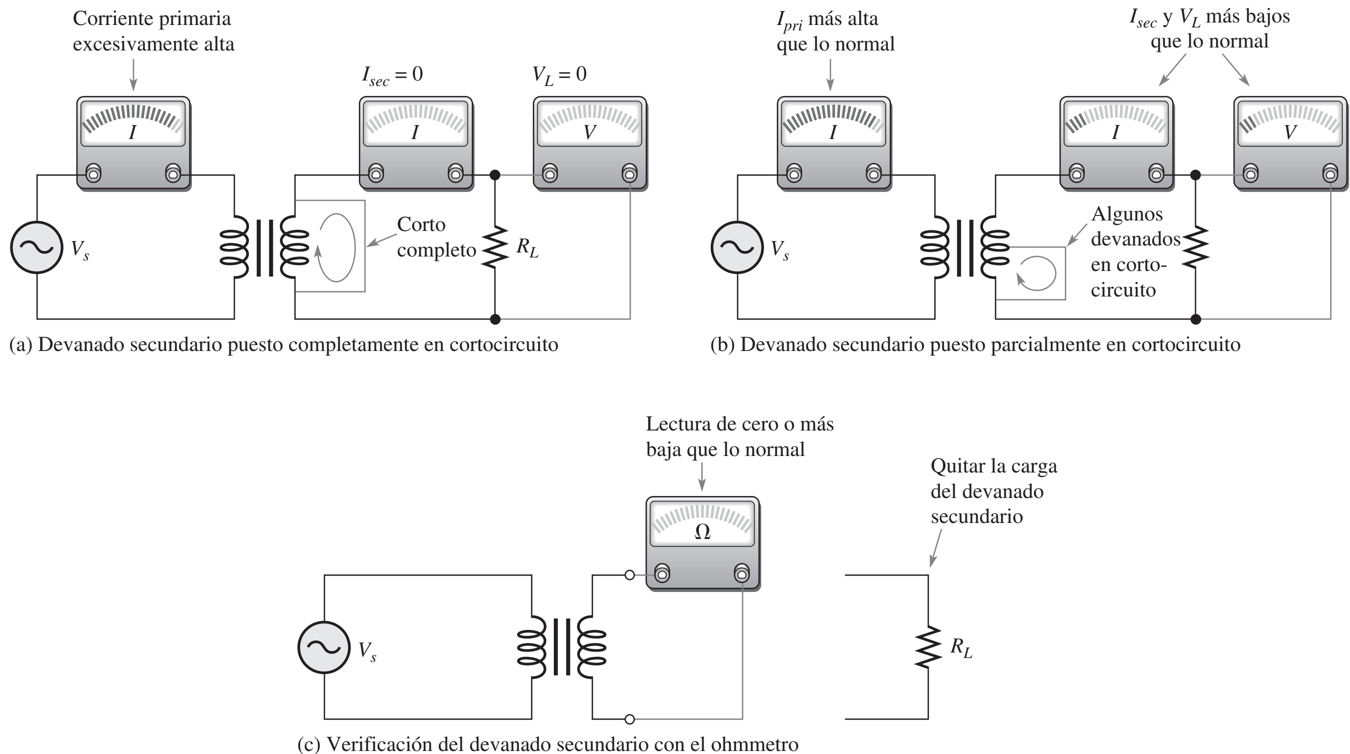


(a) Condiciones cuando el devanado secundario está abierto (b) Verificación del devanado secundario con el ohmmetro

▲ FIGURA 14–36

Devanado secundario abierto.

En el caso de un devanado secundario en cortocircuito o parcialmente en cortocircuito, existe una corriente primaria excesiva debido a la baja resistencia reflejada provocada por el corto. A menudo, esta corriente excesiva quemará el devanado primario y se producirá una abertura. La corriente con un cortocircuito en el devanado secundario propicia que la corriente en la carga sea de cero (corto total) o más pequeña de lo normal (corto parcial), como demuestra la figura 14-37(a) y (b). La verificación con un ohmmetro se muestra en la parte (c).



(a) Devanado secundario puesto completamente en cortocircuito (b) Devanado secundario puesto parcialmente en cortocircuito

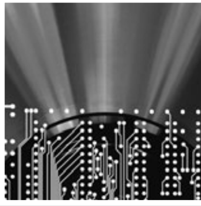
(c) Verificación del devanado secundario con el ohmmetro

▲ FIGURA 14–37

Devanado secundario puesto en cortocircuito.

REPASO DE LA SECCIÓN 14-9

1. Enuncie dos fallas posibles en un transformador y señale cuál es más probable.
2. ¿Cuál es la causa frecuente de falla de un transformador?



Una aplicación de circuito

Una aplicación común del transformador se encuentra en fuentes de potencia de cd. El transformador se utiliza para cambiar y acoplar el voltaje de línea de ca en los circuitos de la fuente de potencia, donde se convierte en voltaje de cd. Usted localizará fallas en cuatro fuentes idénticas de potencia de cd acopladas por transformador y, basado en una serie de mediciones, determinará la falla, si hay alguna, en cada fuente.

El transformador (T_1) mostrado en el esquema de fuente de potencia de la figura 14-38 reduce los 110 V rms presentes en la toma de ca a un nivel que pueda ser convertido por el puente rectificador de diodo, filtrado, y regulado para obtener una salida de 6 V de cd. El rectificador de diodo cambia la ca a un voltaje de cd de onda completa pulsante cuya pulsación es reducida significativamente por el filtro capacitor C_1. El regulador de voltaje es un circuito integrado que toma el voltaje filtrado y proporciona 6 V de cd constantes dentro de un intervalo de valores de carga y variaciones de voltaje de línea. El capacitor C_2 proporciona filtración adicional. Usted aprenderá acerca de estos circuitos en un curso posterior. Los números dentro de círculos que aparecen en la figura 14-38 corresponden a puntos de medición en la tarjeta de la fuente de potencia.

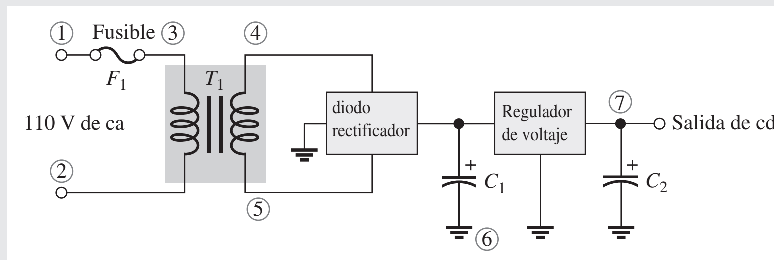
La fuente de potencia

Usted tiene cuatro tarjetas de fuente de potencia idénticas a la tarjeta mostrada en la figura 14-39 para localizar fallas. La línea de potencia que va en dirección al devanado primario del transformador T_1 está protegida por el fusible. El devanado secundario está conectado a la tarjeta de circuito que contiene el rectificador, el filtro y el regulador. Los números dentro de círculos indican los puntos de medición.

Medición de voltajes en la tarjeta 1 de fuente de potencia

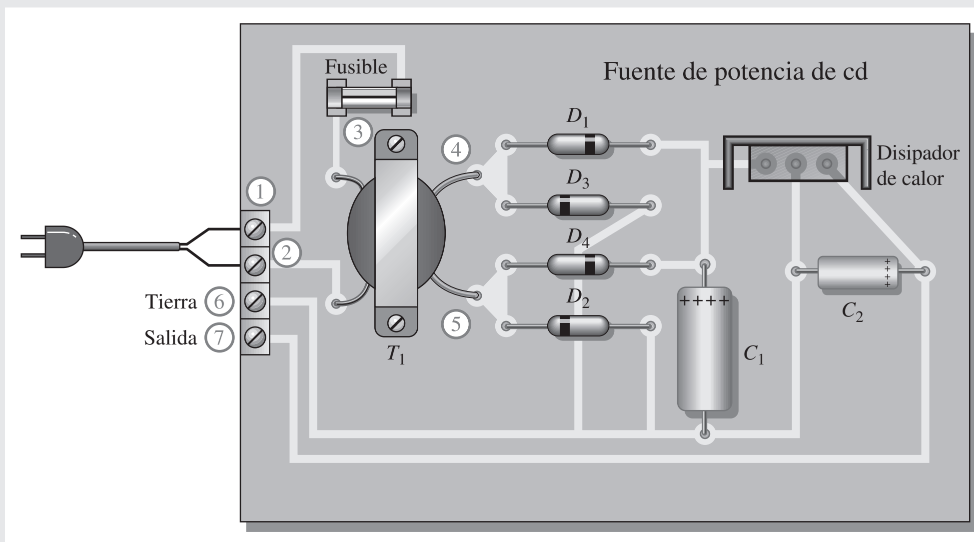
Después de enchufar la fuente de potencia a una toma de corriente estándar, se utiliza un multímetro portátil autoselector de rangos para medir los voltajes. En un medidor autoselector de rangos, el rango de medición apropiado se selecciona automáticamente, en lugar de tener que hacerlo de manera manual como en un multímetro estándar.

- ◆ Determine, a partir de las lecturas de medidor mostradas en la figura 10-40, si la fuente de potencia está o no operando apropiadamente. Si no lo está, restrinja el problema a uno de los siguientes: la tarjeta de circuito que contiene el rectificador, el



◀ FIGURA 14–38

Fuente de potencia de cd acoplada por un transformador básico.



▲ FIGURA 14–39

Tarjeta de fuente de potencia (vista anterior).

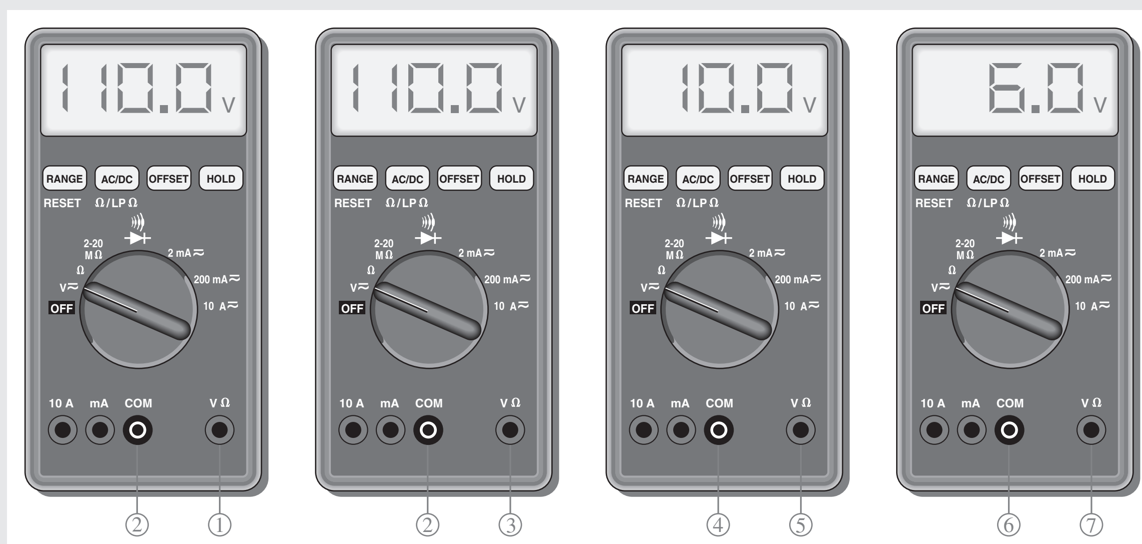
filtro y el regulador; el transformador; el fusible o la fuente de potencia. Los números dentro de círculos en las entradas al medidor corresponden a los puntos numerados en la fuente de potencia que aparece en la figura 14-39.

Medición de voltajes en las tarjetas de potencia 2, 3 y 4

◆ Determine, a partir de las lecturas tomadas con el medidor para las tarjetas 2, 3 y 4 en la figura 14-41, si cada una de las fuentes de potencia está o no funcionando apropiadamente. Si no lo está, restrinja el problema a uno de los siguientes: la tarjeta de circuito que contiene el rectificador, el filtro y el regulador; el transformador; el fusible o la fuente de potencia. Sólo se muestran en pantalla las lecturas del medidor y los puntos de medición correspondientes.

Repaso

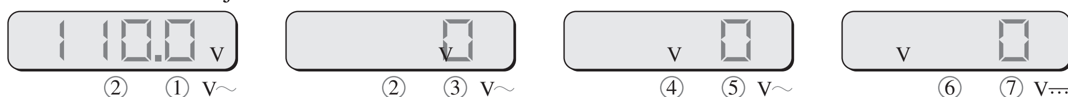
1. Para el caso en que el transformador se encontró defectuoso, ¿cómo puede determinar usted la falla específica (devanados abiertos o devanados en cortocircuito)?
2. ¿Qué tipo de falla propiciaría que se queme el fusible?



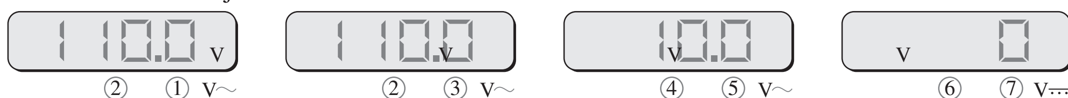
▲ **FIGURA 14–40**

Mediciones de voltaje en la tarjeta 1 de fuente de potencia.

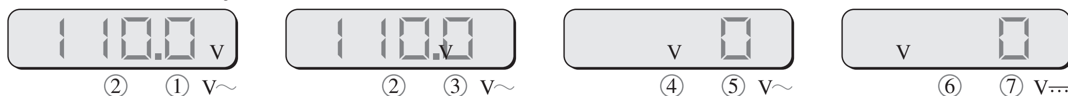
Mediciones en la tarjeta 2



Mediciones en la tarjeta 3



Mediciones en la tarjeta 4



▲ **FIGURA 14–41**

Mediciones en las tarjetas de fuente de potencia 2, 3 y 4.

RESUMEN

- Un transformador normal consta de dos o más bobinas acopladas magnéticamente en un núcleo común.
- Existe inductancia mutua entre dos bobinas acopladas magnéticamente.
- Cuando cambia la corriente en una bobina, se induce voltaje en la otra bobina.
- El primario es el devanado conectado a la fuente, y el secundario es el devanado conectado a la carga.
- El número de vueltas en el primario y el número de vueltas en el secundario determinan la relación de vueltas.
- Las polaridades relativas de los voltajes primario y secundario son determinadas por la dirección de los devanados alrededor del núcleo.
- La relación de vueltas de un transformador elevador es mayor que 1.
- La relación de vueltas de un transformador reductor es menor que 1.
- Un transformador no puede incrementar la potencia.
- En un transformador ideal, la potencia de la fuente (potencia entrada) es igual a la potencia suministrada a la carga (potencia de salida).
- Si el voltaje se eleva, la corriente se reduce y viceversa.
- Una carga a través del devanado secundario de un transformador aparece ante la fuente como una carga reflejada cuyo valor depende del recíproco de la relación de vueltas al cuadrado.
- Ciertos transformadores pueden igualar una resistencia de carga a una resistencia de fuente para lograr la transferencia de potencia máxima cuando se selecciona la relación de vueltas apropiada.
- Un transformador típico no responde a la cd.
- La conversión de energía eléctrica en calor en un transformador real se deriva de las resistencias de los devanados, de la pérdida por histéresis en el núcleo, de las corrientes parásitas en el núcleo, y de la fuga de flujo.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas se definen en el glosario incluido al final de libro.

Acoplamiento magnético Es la conexión magnética entre dos bobinas como resultado de las líneas de flujo magnético cambiantes de una bobina que atraviesan la segunda bobina.

Devanado primario Es el devanado de entrada de un transformador, llamado también *primario*.

Devanado secundario Es el devanado de salida de un transformador, también llamado *secundario*.

Igualación de impedancia Técnica utilizada para igualar una resistencia de carga a una resistencia de fuente y lograr la máxima transferencia de potencia.

Inductancia mutua (L_M) Es la inductancia entre dos bobinas distintas, tal como en un transformador.

Potencia nominal aparente Método para clasificar transformadores en el cual la capacidad de potencia se expresa en volt-amperes (VA).

Relación de vueltas (n) Es la relación de vueltas que hay en el devanado secundario a las vueltas presentes en el devanado primario.

Resistencia reflejada Resistencia en el circuito secundario reflejada en el circuito primario.

Toma central (CT) Conexión en el punto medio del devanado de un transformador.

Transformador Dispositivo eléctrico construido a partir de dos o más bobinas (devanados) acopladas electromagnéticamente entre sí para transferir potencia de una bobina a otra.

FÓRMULAS

14–1 $$k = \frac{\phi_{1-2}}{\phi_1}$$ Coeficiente de acoplamiento

14–2 $$L_M = k\sqrt{L_1 L_2}$$ Inductancia mutua

14–3 $$n = \frac{N_{sec}}{N_{pri}}$$ Relación de vueltas

14–4	$\dfrac{V_{sec}}{V_{pri}} = \dfrac{N_{sec}}{N_{pri}}$	Relación de voltajes
14–5	$V_{sec} = nV_{pri}$	Voltaje secundario
14–6	$\dfrac{I_{pri}}{I_{sec}} = n$	Relación de corrientes
14–7	$I_{sec} = \left(\dfrac{1}{n}\right)I_{pri}$	Corriente secundaria
14–8	$R_{pri} = \left(\dfrac{1}{n}\right)^2 R_L$	Resistencia reflejada
14–9	$n = \sqrt{\dfrac{R_L}{R_{pri}}}$	Relación de vueltas para igualación de impedancia
14–10	$\eta = \left(\dfrac{P_{sal}}{P_{ent}}\right)100\%$	Eficiencia de un transformador

AUTOEVALUACIÓN Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Un transformador se utiliza para
(a) voltajes de cd **(b)** voltajes de ca **(c)** voltajes tanto de cd como de ca

2. ¿Cuál de los siguientes voltajes se ve afectado por la relación de vueltas de un transformador?
(a) voltaje primario **(b)** voltaje de cd
(c) voltaje secundario **(d)** ninguno de éstos

3. Si los devanados de cierto transformador con una relación de vueltas de 1 están enrollados en direcciones opuestas alrededor del núcleo, el voltaje secundario
(a) está en fase con el voltaje primario **(b)** es menor que el voltaje primario
(c) es mayor que el voltaje primario **(d)** está desfasado con respecto al voltaje primario

4. Cuando la relación de vueltas de un transformador es de 10 y el voltaje de ca primario es de 6 V, el voltaje secundario es de
(a) 60 V **(b)** 0.6 V **(c)** 6 V **(d)** 36 V

5. Cuando la relación de vueltas de un transformador es de 0.5 y el voltaje de ca primario es de 100 V, el voltaje secundario es de
(a) 200 V **(b)** 50 V **(c)** 10 V **(d)** 100 V

6. Cierto transformador tiene 500 vueltas en el devanado primario y 2500 en el secundario. La relación de vueltas es de
(a) 0.2 **(b)** 2.5 **(c)** 5 **(d)** 0.5

7. Si se aplican 10 W de potencia al primario de un transformador ideal que tiene relación de vueltas de 5, la potencia suministrada a la carga secundaria es de
(a) 50 W **(b)** 0.5 W **(c)** 0 W **(d)** 10 W

8. En cierto transformador cargado, el voltaje secundario es un tercio del voltaje primario. La corriente secundaria es
(a) un tercio de la corriente primaria
(b) tres veces la corriente primaria
(c) igual a la corriente primaria
(d) menor que la corriente primaria

9. Cuando se conecta un resistor de carga de 1.0 kΩ a través del devanado secundario de un transformador que tiene relación de vueltas de 2, la fuente "ve" una carga reflejada de
(a) 250 Ω **(b)** 2 kΩ **(c)** 4 kΩ **(d)** 1.0 kΩ

10. En la pregunta 9, si la relación de vueltas es de 0.5, la fuente "ve" una carga reflejada de
(a) 1.0 kΩ **(b)** 2 kΩ **(c)** 4 kΩ **(d)** 500 Ω

11. Las vueltas requeridas para igualar una resistencia de fuente de 50 Ω con una resistencia de carga de 200 Ω es de
(a) 0.25 **(b)** 0.5 **(c)** 4 **(d)** 2

12. Se transfiere potencia máxima de una fuente a una carga en un circuito acoplado por transformador cuando

(a) $R_L > R_{ent}$ **(b)** $R_L < R_{ent}$ **(c)** $(1/n)^2 R_L = R_{ent}$ **(d)** $R_L = nR_{ent}$

13. Cuando se conecta una batería de 12 V a través del primario de un transformador que tiene relación de vueltas de 4, el voltaje secundario es de

(a) 0 V **(b)** 12 V **(c)** 48 V **(d)** 3 V

14. Cierto transformador tiene relación de vueltas de 1 y coeficiente de acoplamiento de 0.95. Cuando se aplica un 1 V de ca al primario, el voltaje secundario es de

(a) 1 V **(b)** 1.95 V **(c)** 0.95 V

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 14-43(c).

1. Si la fuente de ca se pone en cortocircuito, el voltaje a través de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

2. Si la fuente de cd se pone en cortocircuito, el voltaje a través de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

3. Si R_L se abre, el voltaje a través de él

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 14-45.

4. Si el fusible se abre, el voltaje a través de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

5. Si la relación de vueltas cambia a 2, la corriente a través de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

6. Si la frecuencia del voltaje de fuente se incrementa, el voltaje a través de R_L

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 14-49.

7. Si el voltaje de fuente se incrementa, el volumen del sonido que sale del altavoz

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

8. Si la relación de vueltas se incrementa, el volumen del sonido que sale del altavoz

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 14-50.

9. Se aplican 10 V rms a través del primario. Si el interruptor izquierdo se mueve de la posición 1 a la posición 2, el voltaje del extremo superior de R_1 a tierra

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

10. De nuevo, se aplican 10 V rms a través del primario. Con ambos interruptores en la posición 1 como se muestra y si R_1 se abre, el voltaje a través de R_1

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 14–1 Inductancia mutua

1. ¿Cuál es la inductancia mutua cuando $k = 0.75$, $L_1 = 1\ \mu$H, y $L_2 = 4\ \mu$H?

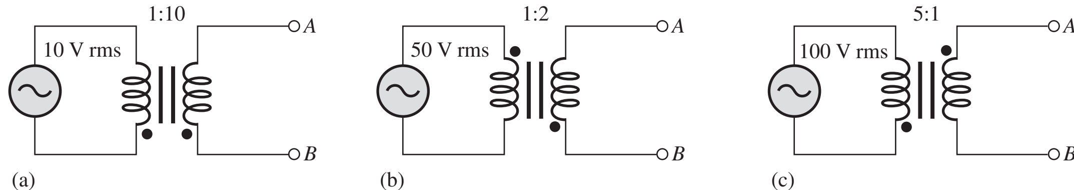
2. Determine el coeficiente de acoplamiento cuando $L_M = 1\ \mu$H, $L_1 = 8\ \mu$H, y $L_2 = 2\ \mu$H.

SECCIÓN 14–2 El transformador básico

3. ¿Cuál es la relación de vueltas de un transformador con 250 vueltas en el primario y 1000 en el secundario? ¿Cuál es la relación de vueltas cuando el devanado primario tiene 400 vueltas y el secundario 100?

4. Cierto transformador tiene 250 vueltas en su devanado primario. Para duplicar el voltaje, ¿cuántas vueltas debe haber en el devanado secundario?

5. Para cada transformador de la figura 14-42, trace el voltaje secundario que muestre su relación con el voltaje primario. Indique también la amplitud.



▲ **FIGURA 14–42**

SECCIÓN 14–3 Transformadores elevadores y reductores

6. Para elevar 240 V de ca a 720 V, ¿cuál debe ser la relación de vueltas?

7. El devanado primario de un transformador tiene 120 V de ca a través de él. ¿Cuál es el voltaje secundario si la relación de vueltas es de 5?

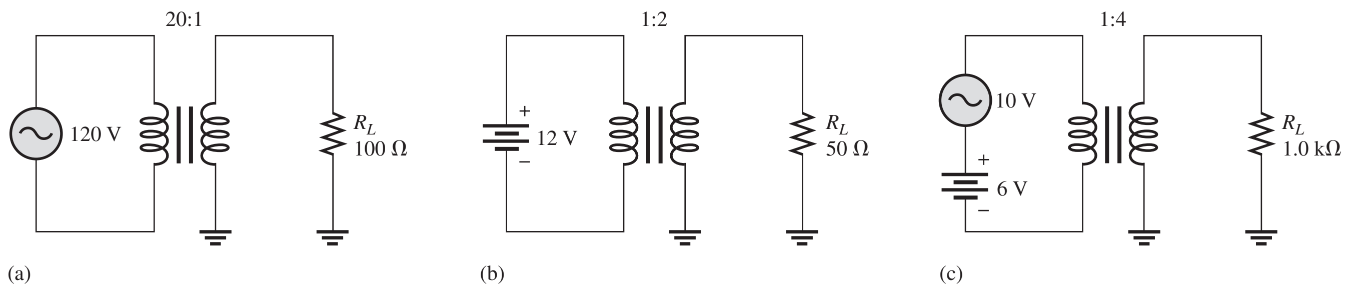
8. ¿Cuántos volts primarios se deben aplicar a un transformador que tiene relación de vueltas de 10 para obtener un voltaje secundario de 60 V de ca?

9. Para reducir 120 V a 30 V, ¿cuál debe ser la relación de vueltas?

10. El devanado primario de un transformador tiene 1200 V a través de él. ¿Cuál es el voltaje secundario si la relación de vueltas es de 0.2?

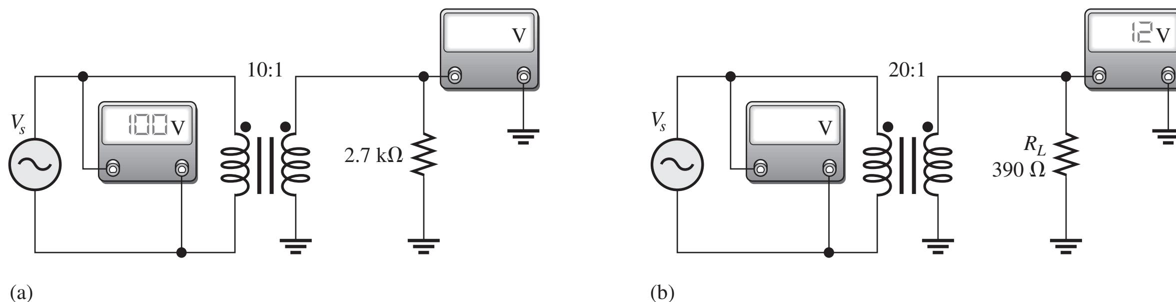
11. ¿Cuántos volts primarios se deben aplicar a un transformador que tiene relación de vueltas de 0.1 para obtener un voltaje secundario de 6 V de ca?

12. ¿Cuál es el voltaje a través de la carga en cada uno de los circuitos de la figura 14-43?



▲ **FIGURA 14–43**

13. Determine las lecturas de medidor no especificadas en la figura 14-44.

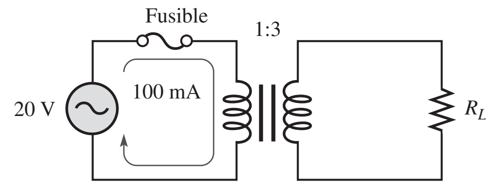


▲ **FIGURA 14–44**

SECCIÓN 14–4 Carga del devanado secundario

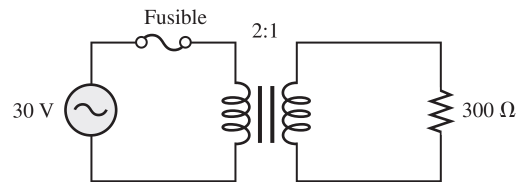
14. Determine I_s en la figura 14-45. ¿Cuál es el valor de R_L?

▶ **FIGURA 14–45**



15. Determine las siguientes cantidades en la figura 14-46.
(a) Corriente primaria **(b)** Corriente secundaria
(c) Voltaje secundario **(d)** Potencia en la carga

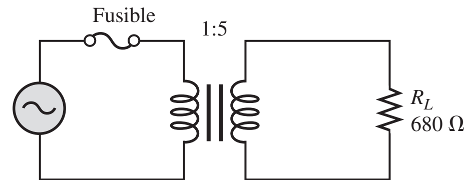
▶ **FIGURA 14–46**



SECCIÓN 14–5 Carga reflejada

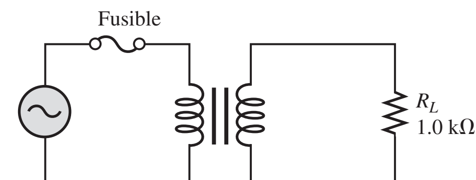
16. ¿Cuál es la resistencia en la carga vista por la fuente en la figura 14-47?

▶ **FIGURA 14–47**



17. ¿Cuál debe ser la relación de vueltas en la figura 14-48 para reflejar 300 Ω en el circuito primario?

▶ **FIGURA 14–48**

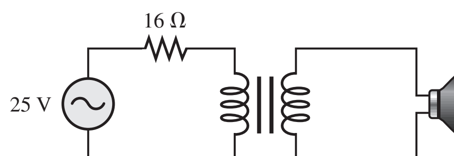


SECCIÓN 14–6 Igualación de impedancia

18. En el circuito de la figura 14-49, encuentre la relación de vueltas requerida para suministrar potencia máxima al altavoz de 4 Ω.

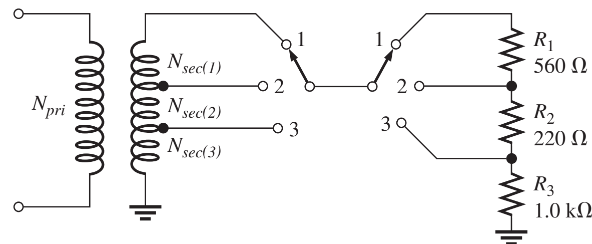
19. En la figura 14-49, ¿cuál es la potencia máxima que puede ser suministrada al altavoz de 4 Ω?

▶ **FIGURA 14–49**



*20. Encuentre la relación de vueltas apropiada en cada una de las posiciones mostradas en la figura 14-50 para transferir potencia máxima a cada carga cuando la resistencia de fuente es de 10 Ω. Especifique el número de vueltas requerido para el devanado secundario si el devanado primario tiene 1000 vueltas.

▶ FIGURA 14–50



SECCIÓN 14–7 Características de un transformador no ideal

21. En cierto transformador, la potencia de entrada al primario es de 100 W, Si se pierden 5.5 W en las resistencias de devanado, ¿cuál es la potencia de salida hacia la carga, omitiendo cualesquiera otras pérdidas?

22. ¿Cuál es la eficiencia del transformador en el problema 21?

23. Determine el coeficiente de acoplamiento de un transformador en el cual un 2% del flujo total generado en el primario no pasa a través del secundario.

*__24.__ La potencia nominal de cierto transformador es de 1 kVA. El transformador opera a 60 Hz y 120 V de ca. El voltaje secundario es de 600 V.

(a) ¿Cuál es la corriente máxima en la carga?

(b) ¿Cuál es el valor R_L más pequeño que puede ser excitado?

(c) ¿Cuál es el capacitor más grande que se puede conectar como carga?

25. ¿Qué potencia nominal en kVA se requiere para un transformador que debe manejar una corriente máxima de 10 A a través de la carga con un voltaje secundario de 2.5 kV?

*__26.__ La potencia nominal de cierto transformador es de 5 kVA, 2400/120 V, a 60 Hz.

(a) ¿Cuál es la relación de vueltas si los 120 V son el voltaje secundario?

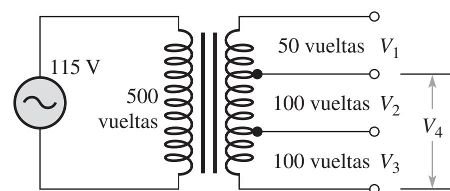
(b) ¿Cuál es la corriente nominal del secundario si los 2400 V son el voltaje primario?

(c) ¿Cuál es la corriente nominal del devanado primario si los 2400 V son el voltaje primario?

SECCIÓN 14–8 Transformadores con tomas y devanados múltiples

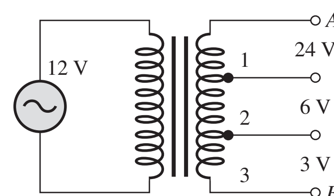
27. Determine cada uno de los voltajes desconocidos indicados en la figura 14-51.

▶ FIGURA 14–51

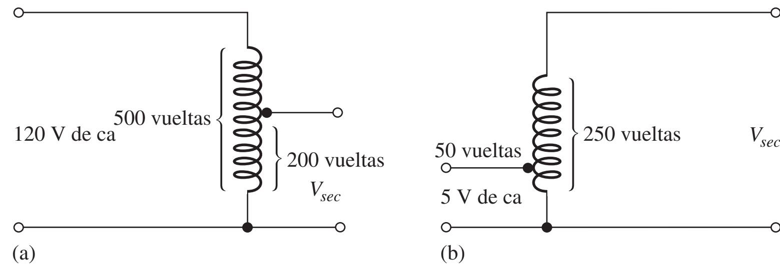


28. Con los voltajes indicados en la figura 14-52, determine la relación de vueltas de cada sección de toma del devanado secundario al devanado primario.

▶ FIGURA 14–52



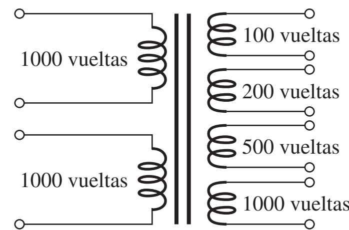
29. Encuentre el voltaje secundario para cada uno de los autotransformadores mostrados en la figura 14-53.



▲ FIGURA 14–53

30. En la figura 14-54, cada primario puede acomodar 120 V de ca. ¿Cómo se deberán conectar los primarios para que operen con 240 V de ca? Determine cada voltaje secundario para operación con 240 V

▶ FIGURA 14–54

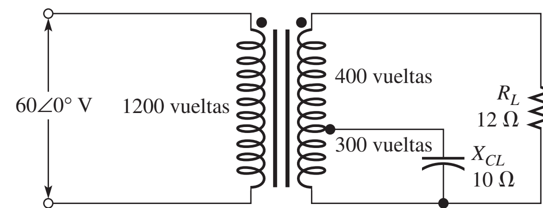


*__31.__ Para el transformador cargado con tomas que muestra la figura 14-55, determine lo siguiente:

(a) Todos los voltajes y corrientes presentes en la carga

(b) La resistencia reflejada en el primario

▶ FIGURA 14–55



SECCIÓN 14–9 Localización de fallas

32. Cuando se aplican 120 V de ca a través del devanado primario de un transformador y se verifica el voltaje en el devanado secundario, se leen 0 V. Una investigación más a fondo muestra que no hay corriente en el primario ni en el secundario. Enumere las posibles fallas. ¿Cuál es el siguiente paso en la investigación del problema?

33. ¿Qué es probable que suceda si el devanado primario de un transformador se pone en cortocircuito?

34. Mientras usted revisa un transformador, se da cuenta que el voltaje secundario es menor de lo que debería ser aunque no es de cero. ¿Cuál es la falla más probable?



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

35. Abra el archivo P14-35 y mida el voltaje secundario. Determine la relación de vueltas.

36. Abra el archivo P14-36 y determine mediante medición si hay un devanado abierto.

37. Abra el archivo P14-37 y determine si hay una falla en el circuito.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 14–1 Inductancia mutua

1. La inductancia mutua es la inductancia que hay entre dos bobinas.
2. $L_M = k\sqrt{L_1L_2} = 45\text{ mH}$
3. El voltaje inducido se incrementa si k aumenta.

SECCIÓN 14–2 El transformador básico

1. La operación de un transformador está basada en la inductancia mutua.
2. La relación de vueltas es la relación de vueltas en el devanado secundario a las vueltas en el devanado primario.
3. La dirección de los devanados determina las polaridades relativas de los voltajes.
4. $n = 250/500 = 0.5$

SECCIÓN 14–3 Transformadores elevadores y reductores

1. Un transformador elevador produce un voltaje secundario mayor que el voltaje primario.
2. V_{sec} es cinco veces más grande que V_{pri}.
3. $V_{sec} = nV_{pri} = 10(240\text{ V}) = 2400\text{ V}$
4. Un transformador reductor produce un voltaje secundario menor que el voltaje primario.
5. $V_{sec} = (0.5)120\text{ V} = 60\text{ V}$
6. $n = 12\text{ V}/120\text{ V} = 0.1$
7. El aislamiento eléctrico es la condición que existe cuando dos bobinas están magnéticamente enlazadas pero sin ninguna conexión eléctrica entre ellas.

SECCIÓN 14–4 Carga del devanado secundario

1. I_{sec} es menor que I_{pri} por una mitad.
2. $I_{sec} = (1000/250)0.5\text{ A} = 2\text{ A}$
3. $I_{pri} = (250/1000)10\text{ A} = 2.5\text{ A}$

SECCIÓN 14–5 Carga reflejada

1. La resistencia reflejada es la resistencia en el secundario, modificada por el recíproco de la relación de vueltas al cuadrado, tal como aparece ante el primario.
2. La relación de vueltas determina la resistencia reflejada.
3. $R_{pri} = (0.1)^2 50\ \Omega = 0.5\ \Omega$
4. $n = 0.1$

SECCIÓN 14–6 Igualación de impedancia

1. La igualación de impedancia permite que la resistencia de carga sea igual a la resistencia de fuente.
2. Se suministra potencia máxima a la carga cuando $R_L = R_s$.
3. $R_{pri} = (100/50)^2 100\ \Omega = 400\ \Omega$

SECCIÓN 14–7 Características de un transformador no ideal

1. En un transformador práctico, la conversión de energía eléctrica en calor reduce la eficiencia. La eficiencia de un transformador ideal es del 100 por ciento.
2. Cuando $k = 0.85$, un 85% del flujo magnético generado en el devanado primario pasa a través del devanado secundario.
3. $I_L = 10\text{ kVA}/250\text{ V} = 40\text{ A}$

SECCIÓN 14–8 Transformadores con tomas y devanados múltiples

1. $V_{sec} = (10)240\text{ V} = 2400\text{ V}$, $V_{sec} = (0.2)240\text{ V} = 48\text{ V}$

2. Un autotransformador es más pequeño y liviano para la misma capacidad que uno convencional. Un autotransformador no tiene aislamiento eléctrico.

SECCIÓN 14–9 Localización de fallas

1. Fallas de transformador: los devanados abiertos son las fallas más comunes, los devanados en cortocircuito son mucho menos comunes.

2. La operación por encima de los valores nominales provocará una falla.

Una aplicación de circuito

1. Use un ohmmetro para revisar en busca de devanados abiertos. Los devanados en cortocircuito se manifiestan mediante un voltaje secundario incorrecto.

2. Un corto hará que se funda el fusible.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

14–1 0.75

14–2 387 μH

14–3 5000 vueltas

14–4 480 V

14–5 57.6 V

14–6 5 mA; 400 mA

14–7 6 Ω

14–8 0.354

14–9 0.0707 o 14.14:1

14–10 85.2%

14–11 $V_{AB} = 12\text{ V}$, $V_{CD} = 480\text{ V}$, $V_{(CT)C} = V_{(CT)D} = 240\text{ V}$, $V_{EF} = 24\text{ V}$

14–12 Se incrementa a 1.75 kVA.

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (c) **3.** (d) **4.** (a) **5.** (b) **6.** (c) **7.** (d) **8.** (b)
9. (a) **10.** (c) **11.** (d) **12.** (c) **13.** (a) **14.** (c)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (b) **2.** (c) **3.** (c) **4.** (b) **5.** (a)
6. (c) **7.** (a) **8.** (a) **9.** (b) **10.** (c)

15 CIRCUITOS *RC*

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

PARTE 1: CIRCUITOS EN SERIE

- Usar números complejos para expresar cantidades fasoriales
- Describir la relación entre corriente y voltaje en un circuito *RC* en serie
- Determinar la impedancia de un circuito *RC* en serie
- Analizar un circuito *RC* en serie

PARTE 2: CIRCUITOS EN PARALELO

- Determinar impedancia y admitancia en un circuito *RC* en paralelo
- Analizar un circuito *RC* en paralelo

PARTE 3: CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

- Analizar circuitos *RC* en serie-paralelo

PARTE 4: TEMAS ESPECIALES

- Determinar potencia en circuitos *RC*
- Analizar algunas aplicaciones básicas de *RC*
- Localizar fallas en circuitos *RC*

TÉRMINOS CLAVE

- Admitancia (Y)
- Ancho de banda
- Factor de potencia
- Filtro
- Forma polar
- Forma rectangular
- Frecuencia de corte
- Impedancia
- Número imaginario
- Número real
- Plano complejo
- Potencia aparente (P_a)
- Respuesta en frecuencia
- Susceptancia capacitiva (B_C)

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

La respuesta de frecuencia del circuito *RC* de entrada en un amplificador es un tema similar a aquel con el que usted ya trabajó en el capítulo 12, y es materia de la aplicación de circuito de este capítulo.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

Un circuito *RC* contiene tanto resistencia como capacitancia. En este capítulo, se presentan circuitos *RC* en serie y en paralelo básicos, así como sus respuestas a voltajes sinusoidales de ca. También se analizan combinaciones dispuestas en serie-paralelo. Se estudian las potencias verdadera, reactiva y aparente en circuitos *RC* y se introducen algunas aplicaciones básicas de circuitos *RC*. Las aplicaciones de circuitos *RC* incluyen filtros, acoplamiento de amplificadores, osciladores, y circuitos modificadores de ondas. En este capítulo también se aborda la localización de fallas.

En la primera sección del capítulo se introducen los números complejos, pues constituyen una herramienta importante para el análisis de circuitos de ca. El sistema de números complejos es una forma de expresar matemáticamente una cantidad fasorial y permite sumar, restar, multiplicar y dividir cantidades fasoriales. En los capítulos 15, 16 y 17 se utilizarán números complejos.

ALTERNATIVAS DE COBERTURA

Este capítulo y los capítulos 16 y 17 están divididos en cuatro partes: Circuitos en serie, Circuitos en paralelo, Circuitos en serie-paralelo, y Temas especiales. Esta organización facilita cualquiera de dos alternativas de cobertura de los circuitos reactivos en los capítulos 15, 16 y 17.

Alternativa 1 Estudiar todos los temas de circuitos *RC* (capítulo 15) primero, seguidos por todos los temas de circuitos RL (capítulo 16), y luego todos los temas de circuitos RLC (capítulo 17). Con este método, simplemente se estudian los capítulos 15, 16 y 17 en secuencia.

Alternativa 2 Estudiar primero los circuitos reactivos en serie. Luego los circuitos reactivos en paralelo, seguidos por los circuitos reactivos en serie-paralelo, y finalmente los temas especiales. Con este método, se cubre la parte 1: Circuitos en serie, capítulos 15, 16 y 17; luego la parte 2: Circuitos en paralelo, capítulos 15, 16 y 17; en seguida la parte 3: Circuitos en serie-paralelo, capítulos 15, 16 y 17. Finalmente, en la parte 4: los temas especiales pueden ser estudiados en cada uno de los capítulos.

CIRCUITOS EN SERIE
Con una introducción a los números complejos

Parte 1

15–1 EL SISTEMA DE LOS NÚMEROS COMPLEJOS

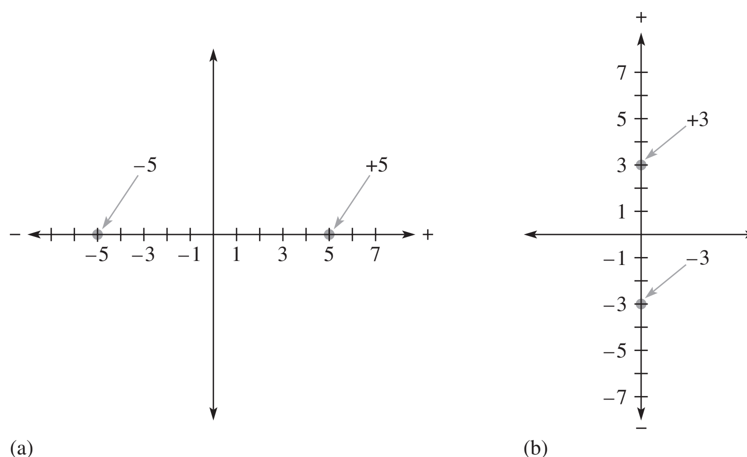
Los números complejos permiten realizar operaciones matemáticas con cantidades fasoriales y son muy útiles en el análisis de circuitos de ca. Con el sistema de los números complejos, se puede sumar, restar, multiplicar y dividir cantidades que tienen tanto magnitud como ángulo, tales como las ondas seno y otras cantidades de circuitos de ca. La mayoría de las calculadoras científicas realizan operaciones con números complejos. Consulte el manual del usuario para conocer el procedimiento exacto.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Utilizar números complejos para expresar cantidades fasoriales**
  - Describir el plano complejo
  - Representar un punto en el plano complejo
  - Analizar los números reales e imaginarios
  - Expresar cantidades fasoriales tanto en forma rectangular como en forma polar
  - Efectuar conversiones entre las formas rectangular y polar
  - Realizar operaciones aritméticas con números complejos

Números positivos y números negativos

Los números positivos están representados por puntos que se localizan a la derecha del origen sobre el eje horizontal de una gráfica, y los números negativos son representados mediante puntos que se ubican a la izquierda del origen, como ilustra la figura 15-1(a). Asimismo, sobre el eje vertical, los números positivos quedan representados por puntos que van hacia arriba del origen, y



◀ **FIGURA 15–1**

Representación gráfica de números positivos y negativos.

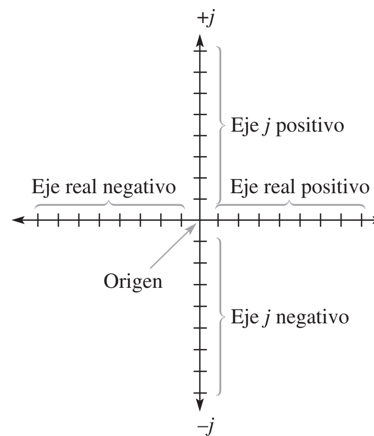
los números negativos se representan mediante puntos por debajo del origen, según muestra la figura 15-1(b).

El plano complejo

Para distinguir entre valores localizados en el eje horizontal y en el eje vertical, se utiliza un **plano complejo**. En éste, al eje horizontal se le llama *eje real*, y al eje vertical se le denomina *eje imaginario*, como indica la figura 15-2. En el trabajo con circuitos eléctricos, se utiliza un prefijo $\pm j$ para designar números que quedan sobre el eje imaginario y distinguirlos así de los números localizados sobre el eje real. Este prefijo se conoce como *operador j*. En matemáticas se emplea una *i* en lugar de una *j*, pero en circuitos eléctricos la *i* puede ser confundida con la corriente instantánea, de modo que se utiliza *j*.

▶ **FIGURA 15–2**

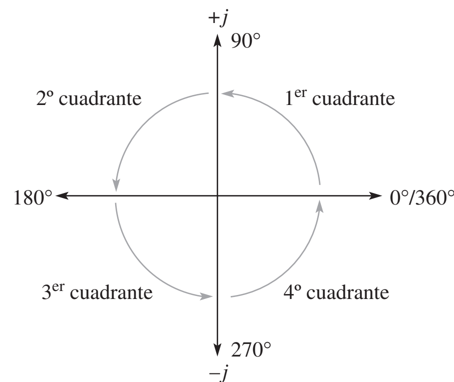
El plano complejo.



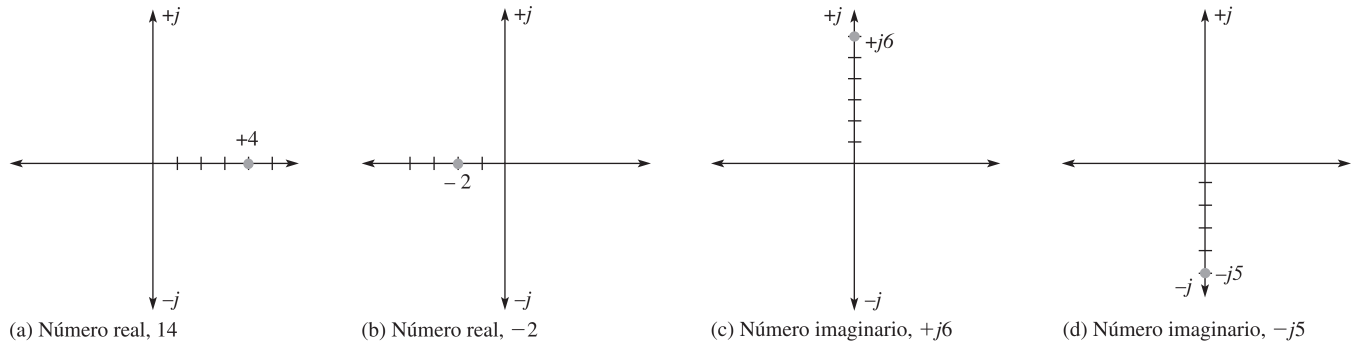
Posición angular en el plano complejo Las posiciones angulares están representadas en el plano complejo, como se muestra en la figura 15-3. El eje real positivo representa cero grados. Prosiguiendo en sentido contrario al de las manecillas del reloj, el eje $+j$ representa 90°, el eje real negativo representa 180°, el eje $-j$ corresponde a 270°, y, tras una rotación completa de 360°, se regresa al eje real positivo. Observe que el plano está dividido en cuatro cuadrantes.

▶ **FIGURA 15–3**

Ángulos en el plano complejo.

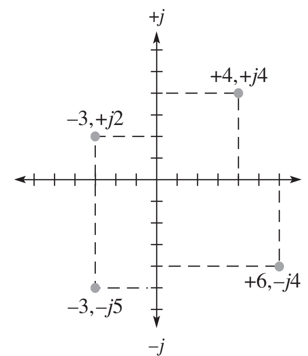


Representación de un punto en el plano complejo Un punto localizado en el plano complejo se clasifica como real, imaginario ($\pm j$), o como una combinación de los dos tipos. Por ejemplo, un punto que esté a 4 unidades del origen sobre el eje real positivo es el **número real** positivo



▲ **FIGURA 15–4**

Números (*j*) reales e imaginarios en el plano complejo.



▲ **FIGURA 15–5**

Puntos coordinados en el plano complejo.

+4, como se muestra en la figura 15-4(a). Un punto a 2 unidades del origen sobre el eje real negativo es el número real negativo −2, según muestra la parte (b). Un punto situado en el eje +*j* a 6 unidades del origen, como indica la parte (c), es el número **imaginario positivo** +*j*6. Por último, un punto a 5 unidades a lo largo del eje −*j* es el número imaginario negativo −*j*5, de acuerdo con la parte (d).

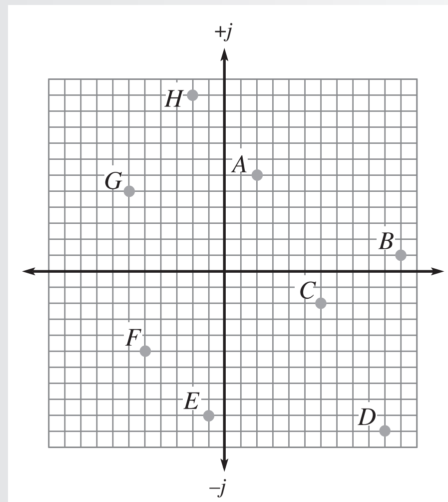
Cuando un punto no está situado sobre cualquier eje sino en alguna parte de uno de los cuatro cuadrantes, es un número complejo y está definido por sus coordenadas. Por ejemplo, en la figura 15-5, el punto localizado en el primer cuadrante tiene un valor real de +4 y un valor *j* de +*j*4, y se expresa como +4, +*j*4. El punto que aparece en el segundo cuadrante tiene las coordenadas −3 y +*j*2. El punto ubicado en el tercer cuadrante tiene las coordenadas −3 y −*j*5. El punto del cuarto cuadrante tiene las coordenadas +6 y −*j*4.

EJEMPLO 15–1

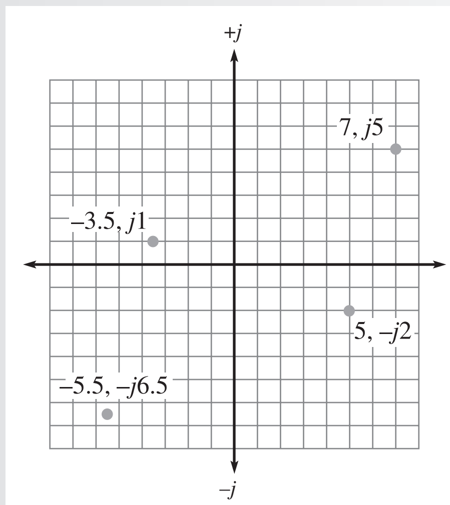
(a) Localice los puntos siguientes en el plano complejo: 7, *j*5; 5, −*j*2; −3.5, *j*1; y −5.5, −*j*6.5.

(b) Determine las coordenadas de cada punto en la figura 15-6.

▶ **FIGURA 15–6**



Solución **(a)** Vea la figura 15-7.



▲ FIGURA 15–7

(b) *A*: **2, *j*6** *B*: **11, *j*1** *C*: **6, −*j*2** *D*: **10, −*j*10**
E: **−1, −*j*9** *F*: **−5, −*j*5** *G*: **−6, *j*5** *H*: **−2, *j*11**

*Problema relacionado** ¿En qué cuadrante está localizado cada uno de los puntos siguientes?

(a) +2.5, +*j*1 **(b)** 7, −*j*5 **(c)** −10, −*j*5 **(d)** −11, +*j*6.8

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Valor de *j*

Si el valor real positivo de +2 se multiplica por *j*, el resultado es +*j*2. Esta multiplicación ha movido efectivamente el +2 a través de un ángulo de 90° hasta el eje +*j*. Asimismo, multiplicar +2 por −*j* lo hace girar −90° hasta el eje −*j*. Por tanto, *j* se considera como un operador rotatorio.

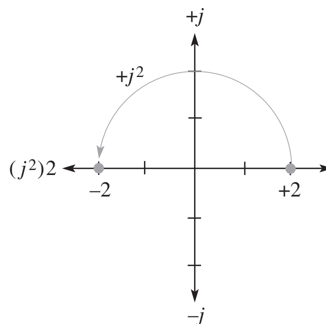
Matemáticamente, el operador *j* tiene un valor de $\sqrt{-1}$). Si +*j*2 se multiplica por *j*, se obtiene

$$j^2 2 = (\sqrt{-1})(\sqrt{-1})(2) = (-1)(2) = -2$$

Este cálculo coloca efectivamente el valor sobre el eje real negativo. Por consiguiente, al multiplicar un número real positivo por j^2 se le convierte en un número real negativo, lo cual, en realidad, es una rotación de 180° en el plano complejo. Esta operación se ilustra en la figura 15-8.

▶ FIGURA 15–8

Efecto del operador *j* en la ubicación de un número en el plano complejo.



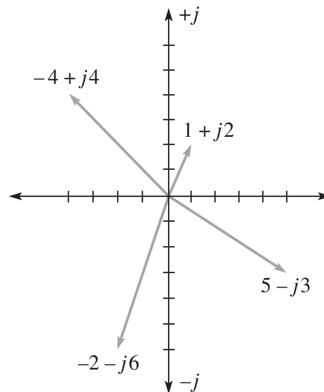
Formas rectangular y polar

Las formas rectangular y polar son dos formas de números complejos que se utilizan para representar cantidades fasoriales. Cada una tiene ciertas ventajas cuando se utiliza en análisis de circuitos, según la aplicación particular. Una cantidad fasorial contiene tanto *magnitud* como posición angular o *fase*. En este texto, letras cursivas tales como V e I son utilizadas para representar sólo magnitud, y con letras rectas en negritas, como **V** e **I**, se representan cantidades fasoriales completas.

Forma rectangular Una cantidad fasorial se representa en **forma rectangular** mediante la suma algebraica del valor real (A) de la coordenada y del valor j (B) de la coordenada, expresado en la siguiente forma general:

$$A + jB$$

Ejemplos de cantidades fasoriales son $1 + j2$, $5 - j3$, $-4 + j4$, y $-2 - j6$, las cuales aparecen en el plano complejo mostrado en la figura 15-9. Como se puede ver, la coordenadas rectangulares describen al fasor en función de sus valores proyectados sobre el eje real y el eje j. Una "flecha" trazada desde el origen hasta el punto coordenado en el plano complejo representa gráficamente la cantidad fasorial.



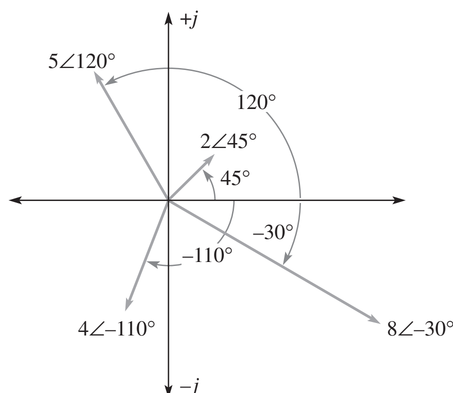
◀ **FIGURA 15–9**

Ejemplos de fasores especificados mediante coordenadas rectangulares.

Forma polar Las cantidades fasoriales también se pueden expresar en **forma polar**, la cual se compone de la magnitud fasorial (C) y la posición angular con respecto al eje real positivo (θ), expresada en la siguiente forma general:

$$C\angle\pm\theta$$

Algunos ejemplos son $2 \angle 45°$, $5 \angle 120°$, $4 \angle -110°$, y $8 \angle -30°$. El primer número es la magnitud y el símbolo $\angle$ precede al valor del ángulo. La figura 15-10 muestra estos fasores en el plano complejo. La longitud del fasor, desde luego, representa la magnitud de la cantidad. Debe tener-

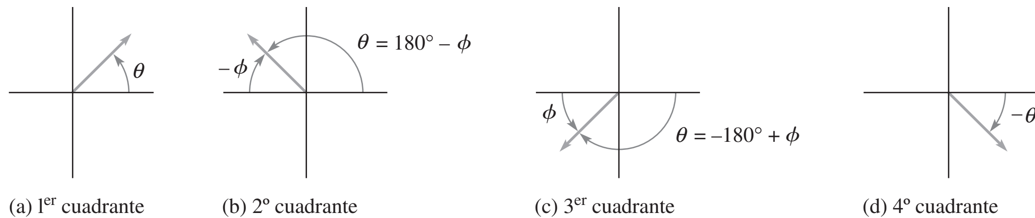


◀ **FIGURA 15–10**

Ejemplos de fasores especificados mediante valores polares.

se en cuenta que por cada fasor expresado en forma polar, también existe una expresión equivalente en forma rectangular.

Conversión de forma rectangular a forma polar Puede existir un fasor en cualquiera de los cuatro cuadrantes del plano complejo, como indica la figura 15-11. El ángulo de fase θ se mide en cada caso con respecto al eje real positivo (0°), y ϕ (fi) es el ángulo situado en el 2º y 3er cuadrantes con respecto al eje real negativo, como se muestra.



▲ **FIGURA 15–11**

Todas las ubicaciones posibles de un fasor en los cuadrantes.

El primer paso para convertir de forma rectangular a forma polar es determinar la magnitud del fasor. Un fasor puede ser visualizado como formando parte de un triángulo rectángulo en el plano complejo, según indica la figura 15-12, para cada ubicación en los cuadrantes. El lado horizontal del triángulo es el valor real A, y el lado vertical es el valor j, B. La hipotenusa del triángulo es la longitud del fasor C, la cual representa la magnitud y puede ser expresada, con el teorema de Pitágoras, como

Ecuación 15–1

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}$$

A continuación, el ángulo θ indicado en las partes (a) y (b) de la figura 15-12 se expresa como una función tangente inversa.

Ecuación 15–2

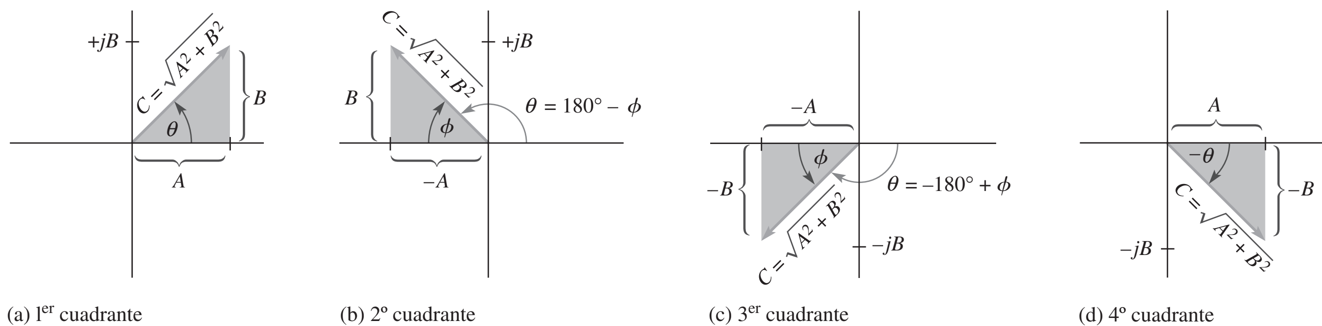
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pm B}{A}\right)$$

El ángulo θ indicado en las partes (b) y (c) de la figura 15-12 es

$$\theta = \pm 180° \mp \phi$$

el cual incluye ambas condiciones tal como señalan los signos duales.

$$\theta = \pm 180° \mp \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$



▲ **FIGURA 15–12**

Relaciones de ángulo recto en el plano complejo.

En cada caso deben utilizarse los signos apropiados en el cálculo.

La fórmula general para convertir de forma rectangular a forma polar es

$$\pm A \pm jB = C\angle\pm\theta$$ **Ecuación 15–3**

El ejemplo 15-2 ilustra el procedimiento de conversión.

EJEMPLO 15–2 Convierta los siguientes números complejos de forma rectangular a forma polar determinando la magnitud y el ángulo:

(a) $8 + j6$ **(b)** $10 - j5$

Solución **(a)** La magnitud del fasor representado por $8 + j6$ es

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{100} = 10$$

Como el fasor está en el primer cuadrante, use la ecuación 15-2. El ángulo es

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pm B}{A}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{6}{8}\right) = 36.9°$$

θ es el ángulo con respecto al eje real positivo. La forma polar de $8 + j6$ es

$$C\angle\theta = \mathbf{10\angle 36.9°}$$

(b) La magnitud del fasor representado por $10 - j5$ es

$$C = \sqrt{10^2 + (-5)^2} = \sqrt{125} = 11.2$$

Como el fasor está en el cuarto cuadrante, use la ecuación 15-2. El ángulo es

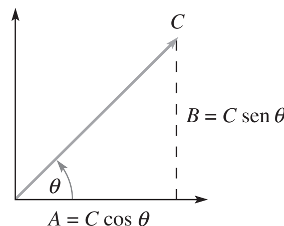
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-5}{10}\right) = -26.6°$$

θ es el ángulo con respecto al eje real positivo. La forma polar de $10 - j5$ es

$$C\angle\theta = \mathbf{11.2\angle -26.6°}$$

Problema relacionado Convierta $18 + j23$ a la forma polar.

Conversión de forma polar a forma rectangular La forma polar proporciona la magnitud y el ángulo de una cantidad fasorial, como se indica en la figura 15-13.



◀ **FIGURA 15–13**

Componentes polares de un fasor.

Para obtener la forma rectangular, se deben encontrar los lados A y B del triángulo utilizando las reglas de trigonometría expresadas a continuación:

$$A = C\cos\theta$$ **Ecuación 15–4**

$$B = C\,\text{sen}\,\theta$$ **Ecuación 15–5**

La fórmula de conversión de polar a rectangular es

$$C\angle\theta = A + jB$$ **Ecuación 15–6**

El siguiente ejemplo demuestra esta conversión.

EJEMPLO 15–3 Convierta las siguientes cantidades polares a forma rectangular:

(a) $10\angle 30°$ **(b)** $200\angle -45°$

Solución **(a)** La parte real del fasor representada por $10 \angle 30°$ es

$$A = C\cos\theta = 10\cos 30° = 10(0.866) = 8.66$$

La parte j de este fasor es

$$jB = jC\,\text{sen}\,\theta = j10\,\text{sen}\,30° = j10(0.5) = j5$$

La forma rectangular de $10 \angle 30°$ es

$$A + jB = \mathbf{8.66 + \mathit{j}5}$$

(b) La parte real del fasor representada por $200 \angle 45°$ es

$$A = 200\cos(-45°) = 200(0.707) = 141$$

La parte j es

$$jB = j200\,\text{sen}(-45°) = j200(-0.707) = -j141$$

La forma rectangular de $200 \angle -45°$ es

$$A + jB = \mathbf{141 - \mathit{j}141}$$

Problema relacionado Convierta $78 \angle -26°$ a forma rectangular.

Operaciones matemáticas

Adición Los números complejos deben estar en forma rectangular para poder sumarlos. La regla es:

Sumar las partes reales de cada número complejo para obtener la parte real de la suma. A continuación, se suman las partes *j* de cada número complejo para obtener la parte *j* de la suma.

EJEMPLO 15–4 Sume los siguientes conjuntos de números complejos:

(a) $8 + j5$ y $2 + j1$ **(b)** $20 - j10$ y $12 + j6$

Solución **(a)** $(8 + j5) + (2 + j1) = (8 + 2) + j(5 + 1) = \mathbf{10 + \mathit{j}6}$

(b) $(20 - j10) + (12 + j6) = (20 + 12) + j(-10 + 6) = 32 + j(-4) = \mathbf{32 - \mathit{j}4}$

Problema relacionado Sume $5 - j1$ y $-6 + j3$.

Sustracción Igual que en la adición, los números deben estar en forma rectangular para poder restarlos. La regla es:

Restar las partes reales de los números para obtener la parte real de la diferencia. A continuación restar las partes *j* de los números para obtener la parte *j* de la diferencia.

EJEMPLO 15–5 Realice las siguientes sustracciones:

(a) Reste $1 + j2$ de $3 + j4$.

(b) Reste $10 - j8$ de $15 + j15$.

Solución **(a)** $(3 + j4) - (1 + j2) = (3 - 1) + j(4 - 2) = \mathbf{2 + j2}$

(b) $(15 + j15) - (10 - j8) = (15 - 10) + j[15 - (-8)] = \mathbf{5 + j23}$

Problema relacionado Reste $3.5 - j4.5$ de $-10 - j9$.

Multiplicación La multiplicación de dos números complejos en forma rectangular se realiza multiplicando, en su oportunidad, cada término de un número por ambos términos del otro y combinando luego los términos reales resultantes y los términos j resultantes (recuerde que $j \times j = -1$). Como un ejemplo,

$$(5 + j3)(2 - j4) = 10 - j20 + j6 + 12 = 22 - j14$$

La multiplicación de dos números complejos es más fácil cuando ambos están en forma polar, por lo que es mejor convertirlos a forma polar antes de multiplicarlos. La regla es:

Multiplicar las magnitudes, y sumar los ángulos algebraicamente.

EJEMPLO 15–6 Realice las siguientes multiplicaciones:

(a) Multiplicar $10 \angle 45°$ por $5 \angle 20°$ **(b)** Multiplicar $2 \angle 60°$ por $4 \angle -30°$

Solución **(a)** $(10\angle 45°)(5\angle 20°) = (10)(5)\angle(45° + 20°) = \mathbf{50\angle 65°}$

(b) $(2\angle 60°)(4\angle -30°) = (2)(4)\angle[60° + (-30°)] = \mathbf{8\angle 30°}$

Problema relacionado Multiplique $50 \angle 10°$ por $3\ 0\angle -60°$.

División La división de dos números complejos en forma rectangular se logra multiplicando tanto el numerador como el denominador por el **complejo conjugado** del denominador y combinando luego los términos para finalmente simplificar. El complejo conjugado de un número se encuentra cambiando el signo del término j. Como un ejemplo,

$$\frac{10 + j5}{2 + j4} = \frac{(10 + j5)(2 - j4)}{(2 + j4)(2 - j4)} = \frac{20 - j30 + 20}{4 + 16} = \frac{40 - j30}{20} = 2 - j1.5$$

Igual que la multiplicación, la división es más fácil cuando los números están en forma polar, por lo que es mejor convertirlos a forma polar antes de dividirlos. La regla es:

Dividir la magnitud del numerador entre la magnitud del denominador para obtener la magnitud del cociente. Restar a continuación el ángulo del denominador del ángulo del numerador para obtener el ángulo del cociente.

EJEMPLO 15–7 Realice las siguientes divisiones:

(a) Divida $100 \angle 50°$ entre $25 \angle 20°$ **(b)** Divida $15 \angle 10°$ entre $3 \angle -30°$.

Solución **(a)** $\dfrac{100\angle 50°}{25\angle 20°} = \left(\dfrac{100}{25}\right)\angle(50° - 20°) = \mathbf{4\angle 30°}$

(b) $\dfrac{15\angle 10°}{3\angle -30°} = \left(\dfrac{15}{3}\right)\angle[10° - (-30°)] = \mathbf{5\angle 40°}$

Problema relacionado Divida $24 \angle -30°$ entre $6 \angle 12°$.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Convierta $2 + j2$ a forma polar. ¿En qué cuadrante está situado este fasor?
2. Convierta $5 \angle -45°$ a forma rectangular. ¿En qué cuadrante está situado este fasor?
3. Sume $1 + j2$ y $3 - j1$.
4. Reste $12 + j18$ de $15 + j25$.
5. Multiplique $8 \angle 45°$ por $2 \angle 65°$.
6. Divida $30 \angle 75°$ entre $6 \angle 60°$.

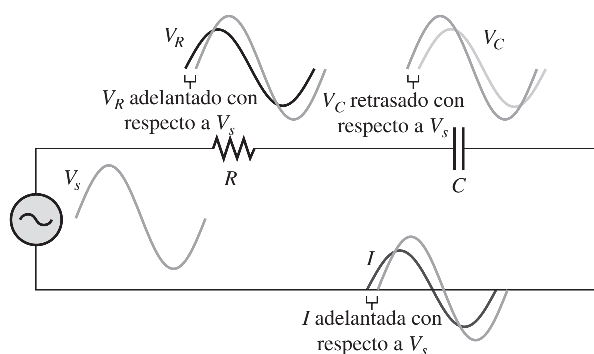
15–2 RESPUESTA SINUSOIDAL DE CIRCUITOS *RC* EN SERIE

Cuando se aplica un voltaje sinusoidal a un circuito *RC* dispuesto en serie, las caídas de voltaje y de corriente resultantes en el circuito son también sinusoidales y tienen la misma frecuencia que el voltaje aplicado. La capacitancia provoca un desplazamiento de fase entre el voltaje y la corriente, el cual depende de los valores relativos de la resistencia y la reactancia capacitiva.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir la relación entre corriente y voltaje en un circuito *RC* en serie**
  - Analizar las formas de onda de voltaje y corriente
  - Analizar el desplazamiento de fase

Tal como se muestra en la figura 15-14, el voltaje en el resistor (V_R), el voltaje en el capacitor (V_C), y la corriente (I) son ondas seno con la frecuencia de la fuente. Se introducen desplazamientos de fase a causa de la capacitancia. El voltaje y la corriente en el resistor *se adelantan* con respecto a la fuente de voltaje, y el voltaje en el capacitor *se retrasa* con respecto al voltaje de fuente. El ángulo de fase entre la corriente y el voltaje en el capacitor siempre es de 90°. Estas relaciones de fase generalizadas se indican en la figura 15-14.



▶ FIGURA 15–14
Ilustración de una respuesta sinusoidal con relaciones de fase generales de V_R, V_C e I con respecto al voltaje de fuente. V_R e I están en fase, mientras que V_R y V_C están desfasados en 90°.

Las amplitudes y las relaciones de fase de voltajes y corriente dependen de los valores de la resistencia y de la **reactancia capacitiva**. Cuando un circuito es puramente resistivo, el ángulo de fase entre el voltaje aplicado (fuente) y la corriente total es de cero. Cuando un circuito es puramente capacitivo, el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total es de 90°, con la corriente adelantando al voltaje. Cuando existe una combinación tanto de resistencia como de reactancia capacitiva en un circuito, el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total se sitúa entre 0° y 90°, según los valores relativos de la resistencia y la reactancia capacitiva.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-2

1. Se aplica un voltaje sinusoidal de 60 Hz a un circuito *RC*. ¿Cuál es la frecuencia del voltaje en el capacitor? ¿Cuál es la frecuencia de la corriente?
2. ¿Qué provoca el desplazamiento de fase entre V_s e I en un circuito *RC* en serie?
3. Cuando en un circuito *RC* la resistencia es mayor que la reactancia capacitiva, ¿el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total se aproxima a 0° o a 90°?

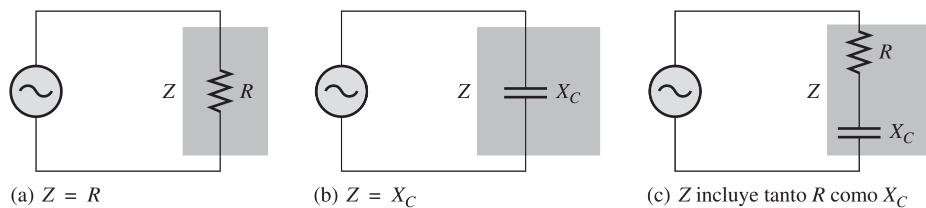
15–3 IMPEDANCIA DE CIRCUITOS *RC* EN SERIE

La **impedancia** de un circuito *RC* en serie consta de resistencia y reactancia capacitiva y es la oposición total a la corriente sinusoidal. Su unidad es el ohm. La impedancia también provoca una diferencia de fase entre la corriente total y el voltaje de fuente. Por consiguiente, la impedancia se compone de una magnitud y un ángulo de fase.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la impedancia de un circuito *RC* en serie**
  - Definir el término *impedancia*
  - Expresar la reactancia capacitiva en forma compleja
  - Expresar la impedancia total en forma compleja
  - Trazar un triángulo de impedancia
  - Calcular la magnitud y el ángulo de fase de la impedancia

En un circuito puramente resistivo, la impedancia es simplemente igual a la resistencia total. En un circuito puramente capacitivo, la impedancia es igual a la reactancia capacitiva total. Tanto la resistencia como la reactancia capacitiva determinan la impedancia de un circuito *RC* dispuesto en serie. Estos casos se ilustran en la figura 15-15. *Z* simboliza la magnitud de la impedancia.



▲ **FIGURA 15–15**

Tres casos de impedancia.

La reactancia capacitiva es una cantidad fasorial y se expresa como un número complejo en forma rectangular de la siguiente manera:

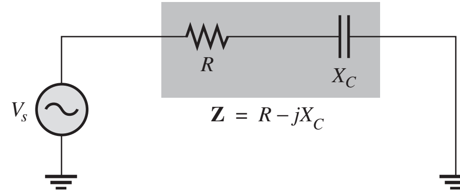
$$\mathbf{X}_C = -jX_C$$

donde $\mathbf{X}_C$ en negritas designa una cantidad fasorial (que representa tanto magnitud como ángulo) y X_C es simplemente la magnitud.

En el circuito *RC* en serie mostrado en la figura 15-16, la impedancia total es la suma fasorial de *R* y $-jX_C$ y se expresa como

Ecuación 15–7

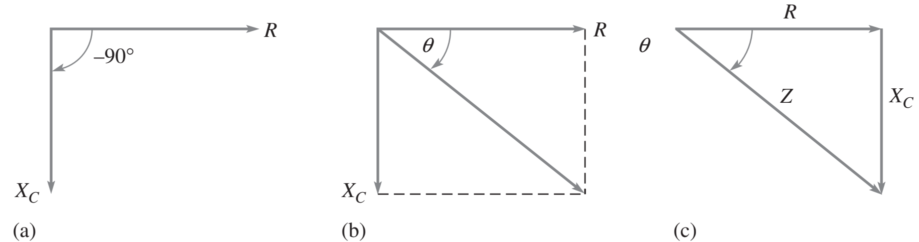
$$\mathbf{Z} = R - jX_C$$



▲ **FIGURA 15–16**

Impedancia en un circuito *RC* en serie.

En el análisis de ca, *R* y X_C son como aparecen en el diagrama fasorial de la figura 15-17(a), donde X_C forma un ángulo de $-90°$ con respecto a *R*. Esta relación se deriva del hecho de que, en un circuito *RC* en serie, el voltaje en el capacitor aparece retrasado con respecto a la corriente, y por tanto, con respecto al voltaje en el resistor, en 90°. Como **Z** es la suma fasorial de *R* y $-jX_C$, su representación fasorial es como se muestra en la figura 15-17(b). Un reposicionamiento de los fasores, como ilustra la parte (c), forma un triángulo rectángulo llamado *triángulo de impedancia*. La longitud de cada fasor representa la magnitud en ohms, y el ángulo θ es el ángulo de fase del circuito *RC* y representa la diferencia de fase entre el voltaje aplicado y la corriente.



▲ **FIGURA 15–17**

Desarrollo del triángulo de impedancia para un circuito *RC* en serie.

De acuerdo con la trigonometría del ángulo recto (teorema de Pitágoras), la magnitud (longitud) de la impedancia se expresa en función de la resistencia y la reactancia como

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

La letra cursiva *Z* representa la magnitud de la cantidad fasorial **Z** y se expresa en ohms.

El ángulo de fase, θ, queda expresado como

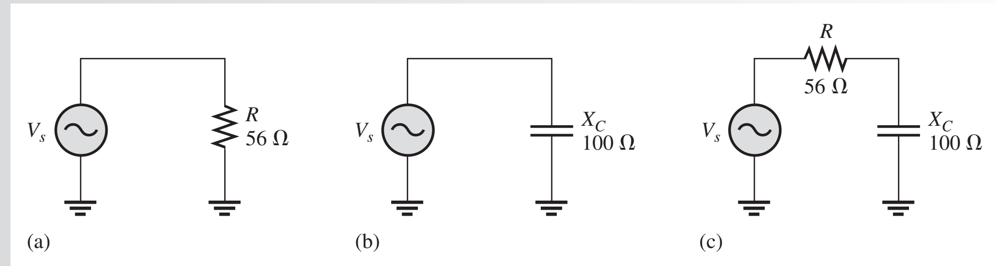
$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

El símbolo $\tan^{-1}$ significa tangente inversa. Se puede encontrar el valor de $\tan^{-1}$ con una calculadora. Si se combinan la magnitud y el ángulo, la expresión fasorial para impedancia en forma polar es

Ecuación 15–8

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

EJEMPLO 15–8 Para cada circuito de la figura 15-18, escriba la expresión fasorial para la impedancia tanto en forma rectangular como en forma polar.



▲ **FIGURA 15–18**

Solución Para el circuito mostrado en la figura 15-18(a), la impedancia es

$$\mathbf{Z} = R - j0 = R = \mathbf{56\ \Omega} \qquad \text{en forma rectangular } (X_C = 0)$$

$$\mathbf{Z} = R\angle 0^\circ = \mathbf{56\angle 0^\circ\ \Omega} \qquad \text{en forma polar}$$

La impedancia es simplemente la resistencia, y el ángulo de fase tiene magnitud de cero porque una resistencia pura no puede causar desplazamiento de fase entre voltaje y corriente.

Para el circuito mostrado en la figura 15-18(b), la impedancia es

$$\mathbf{Z} = 0 - jX_C = \mathbf{-j100\ \Omega} \qquad \text{en forma rectangular } (R = 0)$$

$$\mathbf{Z} = X_C\angle -90^\circ = \mathbf{100\angle -90^\circ\ \Omega} \qquad \text{en forma polar}$$

La impedancia es simplemente la reactancia capacitiva, y el ángulo de fase es de −90° porque la capacitancia provoca que la corriente se adelante en 90° al voltaje.

Para el circuito de la figura 15-18(c), la impedancia en forma rectangular es

$$\mathbf{Z} = R - jX_C = \mathbf{56\ \Omega\ - j100\ \Omega}$$

La impedancia en forma polar es

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(56\ \Omega)^2 + (100\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{56\ \Omega}\right) = \mathbf{115\angle -60.8^\circ\ \Omega}$$

En este caso, la impedancia es la suma fasorial de la resistencia y la reactancia capacitiva. Los valores de X_C y R fijan el ángulo de fase. La conversión de rectangular a polar se puede realizar con una calculadora (consulte el manual del usuario).

Problema relacionado Use su calculadora para convertir la impedancia mostrada en la figura 15-18(c) de forma rectangular a forma polar. Trace el diagrama fasorial de impedancia.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-3

1. La impedancia de cierto circuito *RC* es de 150 Ω − *j*220 Ω. ¿Cuál es el valor de la resistencia? ¿Cuál es el valor de la reactancia capacitiva?
2. La resistencia total de un circuito *RC* en serie es de 33 kΩ y su reactancia capacitiva de 50 kΩ. Escriba la expresión fasorial para la impedancia en forma rectangular.
3. Para el circuito de la pregunta 2, ¿cuál es la magnitud de la impedancia? ¿Cuál es el ángulo de fase?

15–4 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RC* EN SERIE

En esta sección, la ley de Ohm y la ley del voltaje de Kirchhoff se utilizan en el análisis de circuitos *RC* dispuestos en serie para determinar voltaje, corrientes e impedancia. Además, se examinan circuitos *RC* de adelanto y retraso.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un circuito *RC* en serie**
  - Aplicar la ley de Ohm y la ley del voltaje de Kirchhoff a circuitos *RC* en serie
  - Expresar voltajes y corriente como cantidades fasoriales
  - Mostrar cómo varían la impedancia y el ángulo de fase con la frecuencia
  - Exponer y analizar el circuito *RC* de retraso
  - Exponer y analizar el circuito *RC* de adelanto

Ley de Ohm

La aplicación de la ley de Ohm a circuitos *RC* dispuestos en serie implica el uso de las cantidades fasoriales **Z, V** e **I**. Tenga en cuenta que el uso de letras rectas en negritas señala que se trabaja con cantidades fasoriales en donde se incluyen tanto magnitud como ángulo. Las tres formas equivalentes de la ley de Ohm son las siguientes:

Ecuación 15–9
$$\mathbf{V} = \mathbf{IZ}$$

Ecuación 15–10
$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}}$$

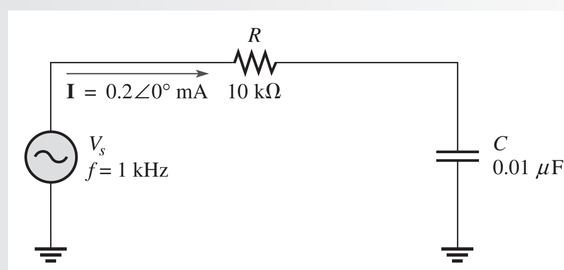
Ecuación 15–11
$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$$

Recordemos que la multiplicación y la división son más fáciles de realizar con las formas polares. Como los cálculos con la ley de Ohm implican multiplicaciones y divisiones, el voltaje, la corriente, y la impedancia deberán expresarse en forma polar. Los dos ejemplos siguientes muestran la relación entre el voltaje y la corriente de la fuente. En el ejemplo 15-9, la corriente es la referencia, y en el ejemplo 15-10, el voltaje es la referencia. Advierta que la referencia se traza a lo largo del eje *x* en ambos casos.

EJEMPLO 15–9

En la figura 15-19, la corriente se expresa en forma polar como $\mathbf{I} = 0.2 \angle 0°$ mA. Determine el voltaje de fuente expresado en forma polar, y trace un diagrama fasorial que muestre la relación entre el voltaje y la corriente de la fuente.

▶ FIGURA 15–19



Solución La magnitud de la reactancia capacitiva es

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1000\text{ Hz})(0.01\ \mu\text{F})} = 15.9\text{ k}\Omega$$

La impedancia total en forma rectangular es

$$\mathbf{Z} = R - jX_C = 10\text{ k}\Omega - j15.9\text{ k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

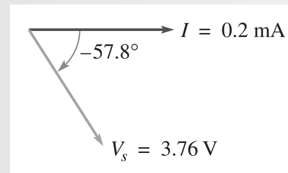
$$= \sqrt{(10\text{ k}\Omega)^2 + (15.9\text{ k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{15.9\text{ k}\Omega}{10\text{ k}\Omega}\right) = 18.8\angle -57.8^\circ\text{ k}\Omega$$

Use la ley de Ohm para determinar el voltaje de fuente.

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{IZ} = (0.2\angle 0^\circ\text{ mA})(18.8\angle -57.8^\circ\text{ k}\Omega) = \mathbf{3.76\angle -57.8^\circ\ V}$$

La magnitud del voltaje de fuente es de 3.76 V a un ángulo de −57.8° con respecto a la corriente; es decir, el voltaje aparece retrasado en 57.8° con respecto a la corriente, como se muestra en el diagrama fasorial de la figura 15-20.

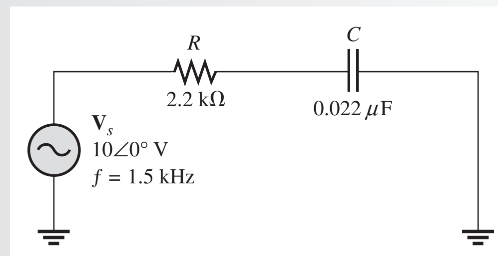
▶ **FIGURA 15–20**



Problema relacionado Determine $\mathbf{V}_s$ en la figura 15-19 si f = 2 kHz e $\mathbf{I} = 0.2\angle 0^\circ$ A.

EJEMPLO 15–10 En el circuito de la figura 15-21, determine la corriente y trace un diagrama fasorial que muestre la relación entre el voltaje y la corriente de la fuente.

▶ **FIGURA 15–21**



Solución La magnitud de la reactancia capacitiva es

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.5\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 4.82\text{ k}\Omega$$

La impedancia total en forma rectangular es

$$\mathbf{Z} = R - jX_C = 2.2\text{ k}\Omega - j4.82\text{ k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

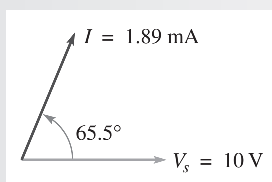
$$= \sqrt{(2.2\ \text{k}\Omega)^2 + (4.82\ \text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{4.82\ \text{k}\Omega}{2.2\ \text{k}\Omega}\right) = 5.30\angle -65.5°\ \text{k}\Omega$$

Use la ley de Ohm para determinar la corriente

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}} = \frac{10\angle 0°\ \text{V}}{5.30\angle -65.5°\ \text{k}\Omega} = \mathbf{1.89\angle 65.5°\ mA}$$

La magnitud de la corriente es de 1.89 mA. El ángulo de fase positivo de 65.5° indica que la corriente adelanta al voltaje en esa cantidad, como se muestra en el diagrama fasorial de la figura 15-22.

▶ FIGURA 15–22



Problema relacionado Determine **I** en la figura 15-21 si la frecuencia se incrementa a 5 kHz.



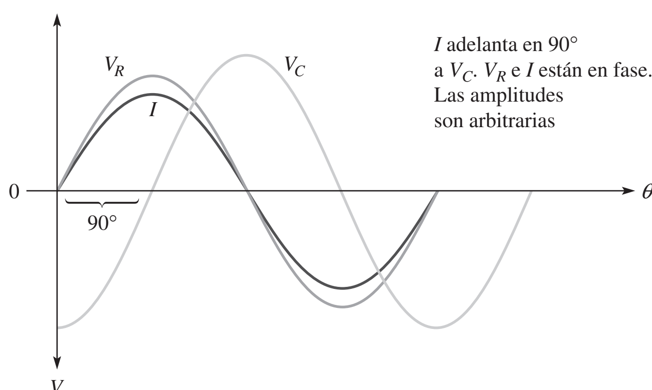
Use el archivo Multisim E15-10 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Relaciones de fase de corriente y voltajes

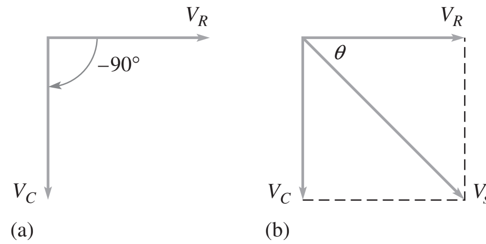
En un circuito *RC* dispuesto en serie, la corriente es la misma a través tanto del resistor como del capacitor. Por tanto, el voltaje en el resistor está en fase con la corriente y el voltaje en el capacitor va retrasado en 90° con respecto a la corriente. Entonces, hay una diferencia de fase de 90° entre el voltaje en el resistor, V_R, y el voltaje en el capacitor, V_C, según muestra el diagrama de la forma de onda de la figura 15-23.

▶ FIGURA 15–23

Relación de fase de voltajes y corriente en un circuito *RC* en serie.



De acuerdo con la ley del voltaje de Kirchhoff, la suma de las caídas de voltaje debe ser igual al voltaje aplicado. Sin embargo, como V_R y V_C no están en fase entre sí, deben ser sumados como cantidades fasoriales, con V_C retrasado en 90° con respecto a V_R, según muestra la figura 15-24(a).



▲ FIGURA 15–24

Diagrama fasorial de voltaje para un circuito *RC* en serie.

En la figura 15-24(b), se observa que $\mathbf{V}_s$ es la suma fasorial de V_R y V_C, tal como expresa en forma rectangular la siguiente ecuación:

$$\mathbf{V}_s = V_R - jV_C$$

Ecuación 15–12

Esta ecuación se expresa en forma polar como

$$\mathbf{V}_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$$

Ecuación 15–13

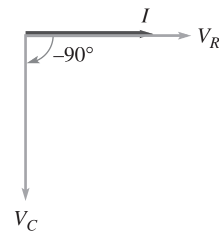
donde la magnitud del voltaje de fuente es

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$$

y el ángulo de fase entre el voltaje en el resistor y el voltaje en la fuente es

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$$

Como el voltaje y la corriente presentes en el resistor están en fase, θ representa asimismo el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente de la fuente. La figura 15-25 muestra un diagrama fasorial completo de voltaje y corriente que representa el diagrama de la forma de onda de la figura 15-23.



▲ FIGURA 15–25

Diagrama fasorial de voltaje y corriente para las formas de onda de la figura 15-23.

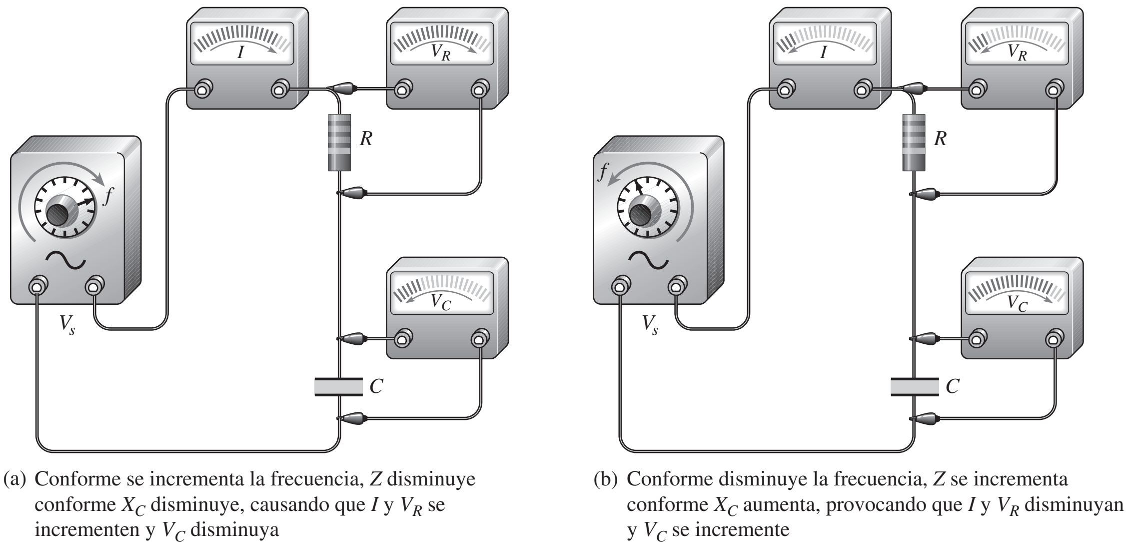
Variación de la impedancia y del ángulo de fase con la frecuencia

Como se sabe, la reactancia capacitiva varía inversamente con la frecuencia. Dado que $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$, se advierte que cuando X_C se incrementa, todo el término dentro del signo de raíz cuadrada también lo hace, y por tanto, la magnitud de la impedancia total también aumenta; y cuando X_C disminuye, asimismo disminuye la magnitud de la impedancia total. Por consiguiente, *en un circuito RC, Z es inversamente dependiente de la frecuencia*.

La figura 15-26 ilustra cómo varían los voltajes y la corriente en un circuito *RC* dispuesto en serie conforme la frecuencia aumenta o disminuye, con el voltaje de fuente mantenido a un valor constante. En la parte (a), conforme la frecuencia se incrementa, X_C disminuye; por ello la caída de voltaje es menor a través del capacitor. Asimismo, Z disminuye conforme X_C disminuye, lo cual provoca que la corriente se incremente. Un incremento de la corriente provoca más voltaje a través de R.

En la figura 15-26(b), conforme la frecuencia disminuye, X_C aumenta; por lo que la caída de voltaje a través del capacitor es más grande. Asimismo, Z se incrementa conforme X_C aumenta, ello causa que la corriente disminuya. Una disminución de la corriente provoca menos voltaje a través de R.

El efecto de los cambios en Z y X_C puede ser observado en la figura 15-27. Conforme aumenta la frecuencia, el voltaje a través de Z permanece constante porque V_s es constante. El voltaje en C también disminuye. La corriente creciente indica que Z está disminuyendo; lo cual es debido a la relación inversa expresada en la ley de Ohm ($Z = V_Z/I$). La corriente creciente indica también que X_C está disminuyendo ($X_C = V_C/I$). La disminución de V_C corresponde a la disminución en X_C.

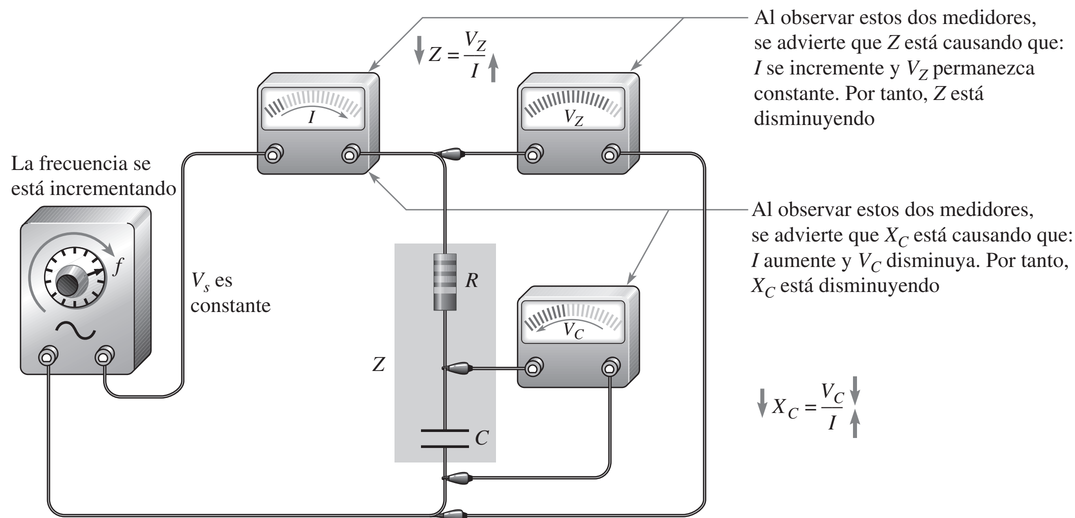


(a) Conforme se incrementa la frecuencia, Z disminuye conforme X_C disminuye, causando que I y V_R se incrementen y V_C disminuya

(b) Conforme disminuye la frecuencia, Z se incrementa conforme X_C aumenta, provocando que I y V_R disminuyan y V_C se incremente

▲ **FIGURA 15–26**

Ilustración de cómo la variación en la impedancia afecta los voltajes y la corriente conforme la frecuencia de la fuente varía. El voltaje de fuente se mantiene a una amplitud constante.

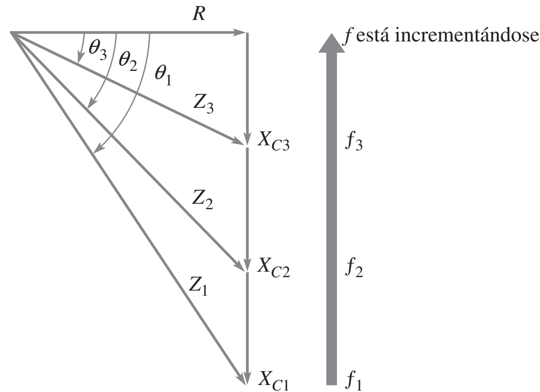


▲ **FIGURA 15–27**

Ilustración de cómo Z y X_C cambian con la frecuencia.

Como X_C es el factor que introduce el ángulo de fase en un circuito *RC* en serie, un cambio en X_C produce un cambio en el ángulo de fase. A medida que aumenta la frecuencia, X_C se vuelve más pequeña, y por tanto el ángulo de fase disminuye. Conforme la frecuencia disminuye, X_C se vuelve más grande, y por tanto el ángulo de fase aumenta. El ángulo entre V_s y V_R es el ángulo de fase del circuito porque I está en fase con V_R. Al medir la fase de V_R, de hecho se está midiendo la fase de I. Normalmente se utiliza un osciloscopio para observar el ángulo de fase al medir el ángulo de fase entre V_s y uno de los voltajes componentes.

La figura 15-28 utiliza el triángulo de impedancia para ilustrar la variación en X_C, Z y θ conforme cambia la frecuencia. Desde luego, R permanece constante. El punto principal es: dado que X_C varía inversamente con la frecuencia, también varían tanto la magnitud de la impedancia total como el ángulo de fase. El ejemplo 15-11 ilustra esto.



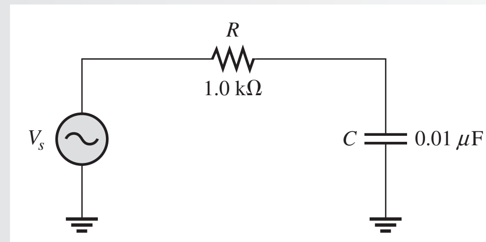
▲ **FIGURA 15–28**

Conforme se incrementa la frecuencia, X_C disminuye, Z disminuye, y θ disminuye. Cada valor de frecuencia puede ser visualizado como formando un triángulo de impedancia diferente.

EJEMPLO 15–11 Para el circuito *RC* en serie de la figura 15-29, determine la magnitud de la impedancia total y el ángulo de fase para cada uno de los valores de frecuencia de entrada:

(a) 10 kHz **(b)** 20 kHz **(c)** 30 kHz

▶ **FIGURA 15–29**



Solución **(a)** Para $f = 10$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 1.59\text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (1.59\text{ k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{1.59\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 1.88\angle -57.8^\circ\text{ k}\Omega$$

Por tanto, $Z =$ **1.88 kΩ** y $\theta =$ **−57.8°**.

(b) Para $f = 20$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(20\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 796\ \Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (796\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{796\ \Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 1.28\angle -38.5^\circ\text{ k}\Omega$$

Por tanto, $Z =$ **1.28 kΩ** y $\theta =$ **−38.5°**.

(c) Con $f = 30$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(30\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 531\ \Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (531\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{531\ \Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 1.13\angle -28.0^\circ\text{ k}\Omega$$

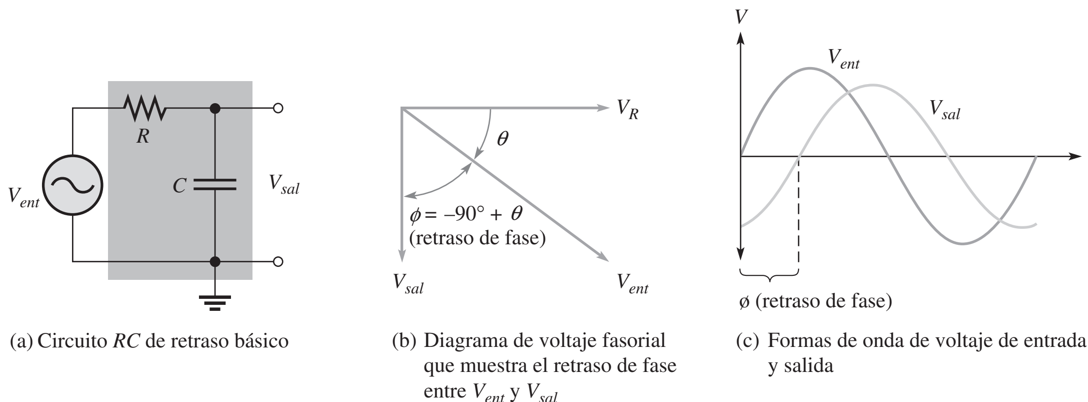
Por tanto, $Z =$ **1.13 kΩ** y $\theta =$ **−28.0°**.

Observe que conforme se incrementa la frecuencia, X_C, Z y θ disminuyen.

Problema relacionado En la figura 15-29, encuentre la magnitud de la impedancia total y el ángulo de fase para $f =$ 1 kHz.

El circuito *RC* de retraso

Un circuito *RC* de retraso es un circuito de desplazamiento de fase en el cual el voltaje de salida se retrasa con respecto al voltaje de entrada en una cantidad específica. La figura 15-30(a) muestra un circuito *RC* en serie, con el voltaje de salida tomado entre las terminales del capacitor. El voltaje de fuente es la entrada, V_{ent}. Como se sabe, θ, el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje de entrada, también es el ángulo de fase entre el voltaje en el resistor y el voltaje de entrada porque V_R e I están en fase entre sí.



(a) Circuito *RC* de retraso básico

(b) Diagrama de voltaje fasorial que muestra el retraso de fase entre V_{ent} y V_{sal}

(c) Formas de onda de voltaje de entrada y salida

▲ **FIGURA 15–30**

Circuito *RC* de retraso ($V_{sal} = V_C$).

Como V_C se retrasa en 90° con respecto a V_R, el ángulo de fase entre el voltaje en el capacitor y el voltaje de entrada es la diferencia entre −90° y θ, como indica la figura 15-30(b). El voltaje en el capacitor es la salida, y se retrasa con respecto a la entrada, y por tanto se crea un circuito de retraso básico.

Las formas de onda de los voltajes de entrada y salida del circuito de retraso se muestran en la figura 15-30(c). La cantidad de la diferencia de fase, designada mediante ϕ, entre la entrada y la salida depende de las medidas relativas de la reactancia capacitiva y la resistencia, como lo es la magnitud del voltaje de salida.

Diferencia de fase entre entrada y salida Como ya se estableció, θ es el ángulo de fase entre I y V_{ent}. El ángulo entre V_{sal} y V_{ent} se designa mediante ϕ (fi) y se desarrolla como sigue.

Las expresiones polares para el voltaje y la corriente de entrada son $V_{ent}\angle 0°$ e $I\angle\theta$, respectivamente. El voltaje de salida en forma polar es

$$\mathbf{V}_{sal} = (I\angle\theta)(X_C\angle -90^\circ) = IX_C\angle(-90^\circ + \theta)$$

La ecuación precedente establece que el voltaje de salida forma un ángulo de $-90° + \theta$ con respecto al voltaje de entrada. Como $\theta = -\tan^{-1}(X_C/R)$, el ángulo ϕ entre la entrada y la salida es

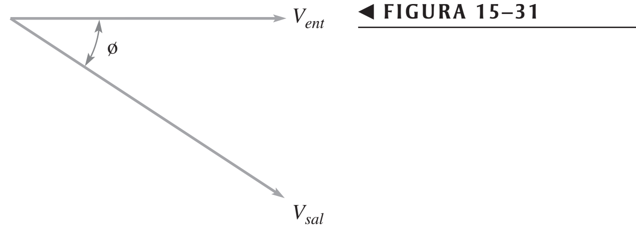
$$\phi = -90° + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

De manera equivalente, este ángulo se expresa como

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$$

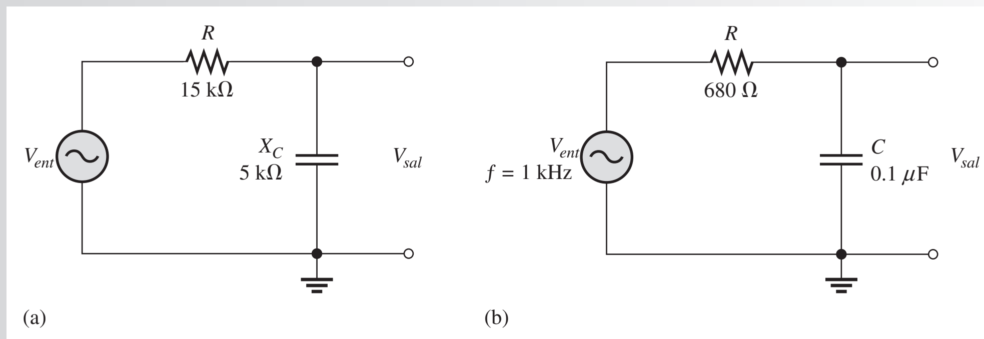
Ecuación 15–14

El ángulo siempre es negativo, lo cual indica que el voltaje de salida se retrasa con respecto al voltaje de entrada, como ilustra la figura 15-31.



◀ **FIGURA 15–31**

EJEMPLO 15–12 Determine la cantidad de retraso de fase desde la entrada hasta la salida en cada circuito de retraso mostrado en la figura 15-32.



▲ **FIGURA 15–32**

Solución Para el circuito de retraso de la figura 15-32(a),

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{15\text{ k}\Omega}{5\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{-71.6°}$$

La salida se retrasa en 71.6° con respecto a la entrada,

Para el circuito de retraso mostrado en la figura 15-32(b), determine primero la reactancia capacitiva,

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1\text{ kHz})(0.1\ \mu\text{F})} = 1.59\text{ k}\Omega$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{680\ \Omega}{1.59\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{-23.2°}$$

La salida se retrasa en 23.2° con respecto a la entrada.

Problema relacionado En un circuito de retraso, ¿qué le sucede al retraso de fase si la frecuencia se incrementa?



Use los archivos Multisim E15-12A y E15-12B para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Magnitud del voltaje de salida Para evaluar el voltaje de salida en función de su magnitud, visualice el circuito *RC* de retraso como un divisor de voltaje. Una parte del voltaje de entrada total decae a través del resistor y una parte a través del capacitor. Como el voltaje de salida es el voltaje a través del capacitor, se puede calcular con la ley de Ohm ($V_{sal} = IX_C$) o mediante la fórmula del divisor de voltaje.

Ecuación 15–15

$$V_{sal} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent}$$

La expresión fasorial para el voltaje de salida de un circuito *RC* de retraso es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi$$

EJEMPLO 15–13 Para el circuito de retraso de la figura 15-32(b)(ejemplo 15-12), determine el voltaje de salida en forma fasorial cuando el voltaje de entrada tiene un valor rms de 10 V. Trace las formas de onda del voltaje de entrada y salida que muestren la relación de fase apropiada. La reactancia capacitiva X_C (1.59 kΩ) y ϕ (−23.2°) se encontraron en el ejemplo 15-12.

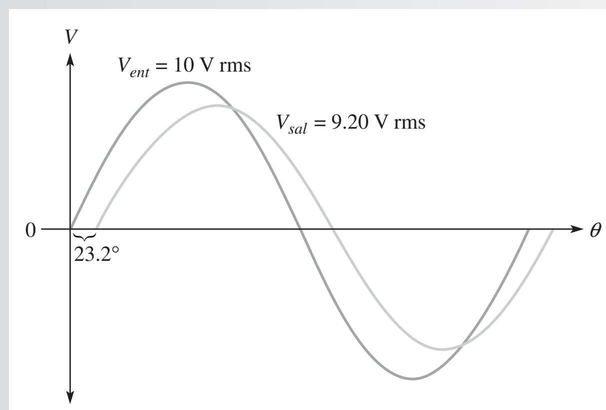
Solución El voltaje de salida en forma fasorial es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent}\angle\phi$$

$$= \left(\frac{1.59\text{ k}\Omega}{\sqrt{(680\ \Omega)^2 + (1.59\text{ k}\Omega)^2}}\right)10\angle -23.2^\circ\text{ V} = \mathbf{9.20\angle -23.2^\circ\text{ V rms}}$$

Las formas de onda se muestran en la figura 15-33. Observe que el voltaje de salida se retrasa en 23.2° con respecto al voltaje de entrada.

▶ **FIGURA 15–33**



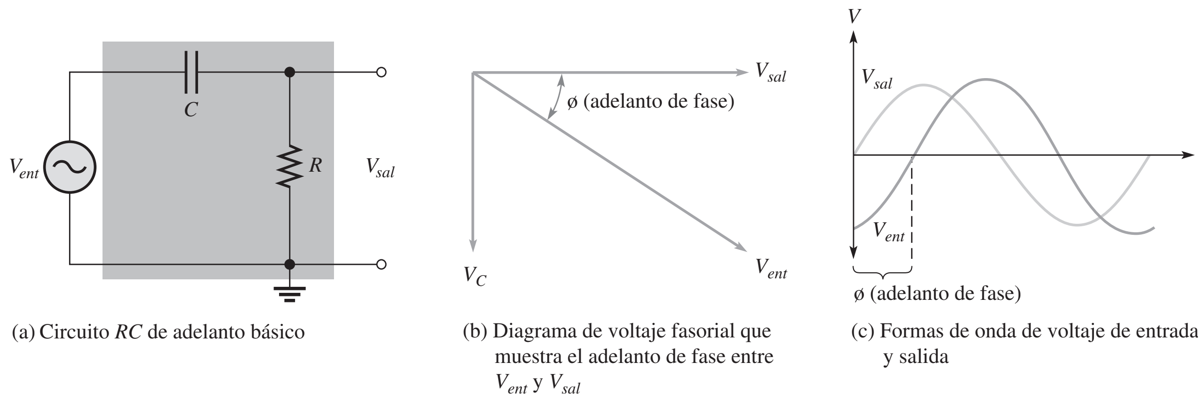
Problema relacionado En un circuito de retraso, ¿qué le sucede al voltaje de salida si la frecuencia se incrementa?



Use el archivo Multisim E15-13 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

El circuito *RC* de adelanto

Un circuito *RC* de adelanto es un circuito de desplazamiento de fase en el cual el voltaje de salida se adelanta al voltaje de entrada en una cantidad especificada. Cuando la salida de un circuito *RC* en serie se toma a través del resistor en lugar de a través del capacitor, como indica la figura 15-34(a), llega a ser un circuito de adelanto.



(a) Circuito *RC* de adelanto básico

(b) Diagrama de voltaje fasorial que muestra el adelanto de fase entre V_{ent} y V_{sal}

(c) Formas de onda de voltaje de entrada y salida

▲ **FIGURA 15–34**

Circuito *RC* de adelanto ($V_{sal} = V_R$).

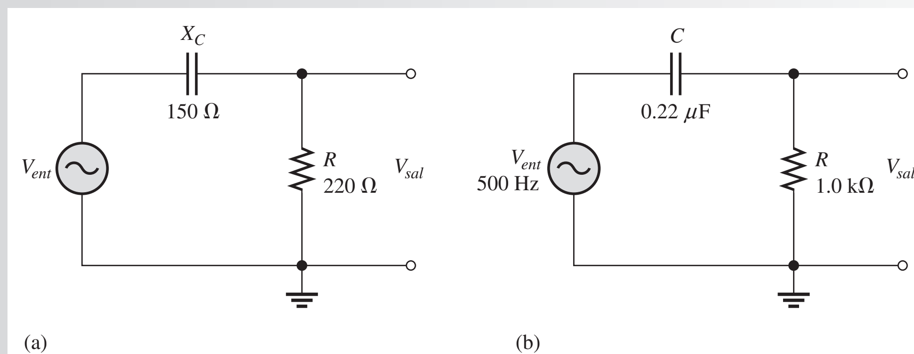
Diferencia de fase entre entrada y salida En un circuito *RC* dispuesto en serie, la corriente se adelanta al voltaje de entrada. Además, como se sabe, el voltaje en el resistor está en fase con la corriente. Dado que el voltaje de salida se toma a través del resistor, la salida se adelanta a la entrada, tal como indica el diagrama fasorial de la figura 15-34(b). Las formas de onda se muestran en la figura 15-34(c).

Igual que en el circuito de retraso, la cantidad de diferencia de fase entre la entrada y la salida y la magnitud del voltaje de salida en el circuito de adelanto dependen de los valores relativos de la resistencia y la reactancia capacitiva. Cuando al voltaje de entrada se le asigna un ángulo de referencia de 0°, el ángulo del voltaje de salida es el mismo que θ (el ángulo entre la corriente total y el voltaje aplicado) porque el voltaje en el resistor (salida) y la corriente están en fase entre sí. Por consiguiente, como $\phi = \theta$ en este caso, la expresión es

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$ **Ecuación 15–16**

Este ángulo es positivo porque la salida se adelanta a la entrada.

EJEMPLO 15–14 Calcule el ángulo de fase de la salida para cada circuito mostrado en la figura 15-35.



▲ **FIGURA 15–35**

Solución Para el circuito de adelanto de la figura 15-35(a).

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{150\ \Omega}{220\ \Omega}\right) = \mathbf{34.3^\circ}$$

La salida se adelanta en 34.3° a la entrada.

Para el circuito de adelanto de la figura 15-35(b), primero se determina la reactancia capacitiva.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(500\text{ Hz})(0.22\ \mu\text{F})} = 1.45\text{ k}\Omega$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1.45\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{55.4^\circ}$$

La salida se adelanta en 55.4° a la entrada.

Problema relacionado En un circuito de adelanto, ¿qué le sucede al adelanto de fase si la frecuencia se incrementa?



Use los archivos Multisim E15-14A y E15-14B para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Magnitud del voltaje de salida Como el voltaje de salida de un circuito *RC* de adelanto se toma a través del resistor, la magnitud se calcula con la ley de Ohm ($V_{sal} = IR$) o mediante la fórmula del divisor de voltaje.

Ecuación 15–17

$$V_{sal} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent}$$

La expresión para el voltaje de salida en forma fasorial es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi$$

EJEMPLO 15–15 En la figura 15-35(b), el voltaje de salida (ejemplo 15-14) tiene un valor rms de 10 V. Determine la expresión fasorial para el voltaje de salida. Trace las relaciones de forma de onda para los voltajes de entrada y salida que muestren valores pico. El ángulo de fase (55.4°) y X_C (1.45 kΩ) se encontraron en el ejemplo 15-14.

Solución La expresión fasorial para el voltaje de salida es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent}\angle\phi$$

$$= \left(\frac{1.0\text{ k}\Omega}{1.76\text{ k}\Omega}\right)10\angle 55.4^\circ\text{ V} = \mathbf{5.68\angle 55.4^\circ\ V\ rms}$$

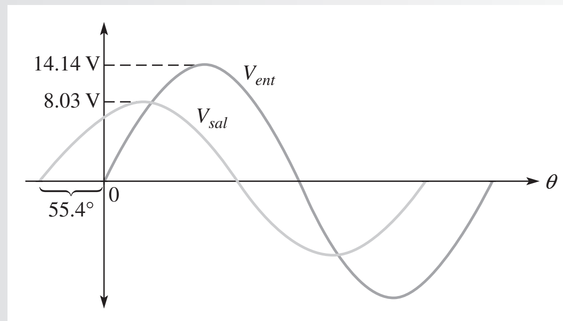
El valor pico del voltaje de entrada es

$$V_{ent(p)} = 1.414V_{ent(rms)} = 1.414(10\text{ V}) = 14.14\text{ V}$$

El valor pico del voltaje de salida es

$$V_{sal(p)} = 1.414V_{sal(rms)} = 1.414(5.68\text{ V}) = 8.03\text{ V}$$

Las formas de onda se muestran en la figura 15-36.



▲ FIGURA 15–36

Problema relacionado En un circuito de adelanto, ¿qué le sucede al voltaje de salida si la frecuencia se reduce?



Use el archivo Multisim E15-15 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-4

1. En cierto circuito *RC* en serie, $V_R = 4$ V y $V_C = 6$ V. ¿Cuál es la magnitud del voltaje de fuente?
2. En la pregunta 1, ¿cuál es el ángulo de fase entre el voltaje de fuente y la corriente?
3. ¿Cuál es la diferencia de fase entre el voltaje en el capacitor y el voltaje en el resistor en un circuito *RC* en serie?
4. Cuando la frecuencia del voltaje aplicado en un circuito *RC* en serie se incrementa, ¿qué le sucede a la reactancia capacitiva? ¿Qué pasa con la magnitud de la impedancia total? ¿Qué le sucede al ángulo de fase?
5. Cierto circuito *RC* de retraso consta de un resistor de 4.7 kΩ y un capacitor de 0.022 μF. Determine el desplazamiento de fase entre la entrada y la salida a una frecuencia de 3 kHz.
6. Un circuito *RC* de adelanto tiene los mismos valores de componentes que el circuito de retraso de la pregunta 5. ¿Cuál es la magnitud del voltaje de salida a 3 kHz cuando la entrada es de 10 V rms?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de circuitos reactivos en serie continúa en el capítulo 16, parte 1, en la página 678.

Parte 2

Circuitos en paralelo

15–5 Impedancia y admitancia de circuitos *RC* en paralelo

En esta sección se aprenderá cómo determinar la impedancia y el ángulo de fase de un circuito *RC* dispuesto en paralelo. La impedancia se compone de un componente de magnitud y un componente de ángulo de fase. También, se introducen la susceptancia capacitiva y la admitancia de un circuito *RC* en paralelo.

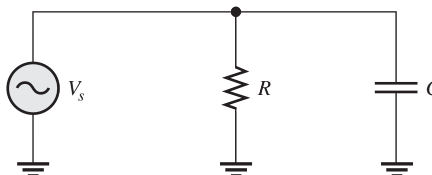
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar impedancia y admitancia en un circuito *RC* en paralelo**
  - Expresar la impedancia total en forma compleja
  - Definir y calcular los términos de *conductancia*, *susceptancia capacitiva,* y *admitancia*

La figura 15-37 muestra un circuito básico *RC* en paralelo, el cual se encuentra conectado a una fuente de voltaje de ca.

▶ FIGURA 15–37

Circuito *RC* en paralelo básico.



La expresión para la impedancia total se desarrolla como sigue, por medio de números complejos. Como existen sólo dos componentes, *R* y *C*, la impedancia total se encuentra con la regla del producto sobre la suma.

$$\mathbf{Z} = \frac{(R\angle 0^\circ)(X_C\angle -90^\circ)}{R - jX_C}$$

Al multiplicar las magnitudes, sumar los ángulos presentes en el numerador, y convertir el denominador a forma polar, se obtiene

$$\mathbf{Z} = \frac{RX_C\angle(0^\circ - 90^\circ)}{\sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)}$$

Ahora, dividiendo la expresión para la magnitud presente en el numerador entre aquella presente en el denominador, y restando el ángulo presente en el denominador del presente en el numerador, se obtiene

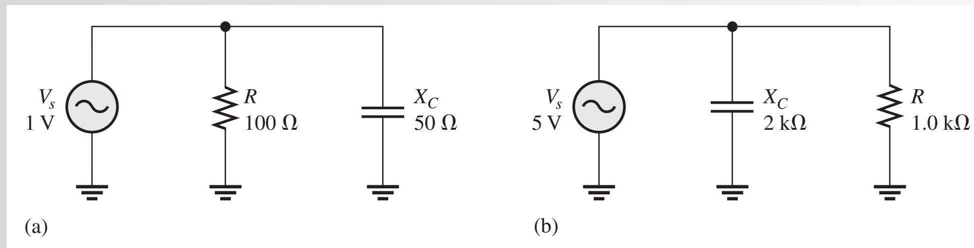
$$\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)\angle\left(-90^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)\right)$$

De manera equivalente, esta expresión se escribe como

$$\mathbf{Z} = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \angle -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$$

Ecuación 15–18

EJEMPLO 15–16 Para cada uno de los circuitos mostrados en la figura 15-38, determine la magnitud y el ángulo de fase de la impedancia total.



▲ **FIGURA 15–38**

Solución Para el circuito de la figura 15-38(a), la impedancia total es

$$\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right) \angle -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$$

$$= \left(\frac{(100\ \Omega)(50\ \Omega)}{\sqrt{(100\ \Omega)^2 + (50\ \Omega)^2}}\right) \angle -\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{50\ \Omega}\right) = \mathbf{44.7 \angle -63.4^\circ\ \Omega}$$

Por tanto, $Z = 44.7\ \Omega$ y $\theta = -63.4^\circ$.

Para el circuito de la figura 15-38(b), la impedancia total es

$$\mathbf{Z} = \left(\frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2\ \text{k}\Omega)}{\sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2 + (2\ \text{k}\Omega)^2}}\right) \angle -\tan^{-1}\left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{2\ \text{k}\Omega}\right) = \mathbf{894 \angle -26.6^\circ\ \Omega}$$

Por tanto, $Z = 894\ \Omega$ y $\theta = -26.6^\circ$.

Problema relacionado Determine Z en la figura 15-38(a) si la frecuencia se duplica.

Conductancia, susceptancia y admitancia

Recordemos que la **conductancia, *G***, es el recíproco de la resistencia. La expresión fasorial para la conductancia se establece como

$$\mathbf{G} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} = G\angle 0^\circ$$

Ahora se introducen dos términos nuevos que son utilizados en circuitos *RC* en paralelo. La **susceptancia capacitiva (B_C)** es el recíproco de la reactancia capacitiva. La expresión fasorial para susceptancia capacitiva es

$$\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} = B_C\angle 90^\circ = +jB_C$$

La **admitancia (*Y*)** es el recíproco de la impedancia. La expresión fasorial para admitancia es

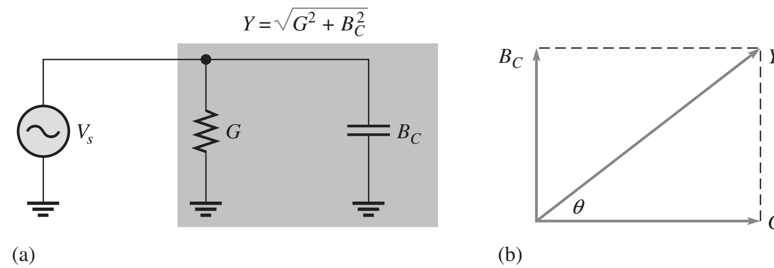
$$\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle \pm\theta} = Y\angle \mp\theta$$

La unidad de cada uno de estos términos es el siemens (S), el cual es el recíproco del ohm.

Cuando se trabaja con circuitos en paralelo, a menudo es más fácil utilizar la conductancia (G), la susceptancia capacitiva (B_C), y la admitancia (Y) en lugar de la resistencia (R), la reactancia capacitiva (X_C), y la impedancia (Z). En un circuito *RC* en paralelo, como se muestra en la figura 15-39, la admitancia total es simplemente la suma fasorial de la conductancia y la susceptancia capacitiva.

Ecuación 15–19

$$\mathbf{Y} = G + jB_C$$



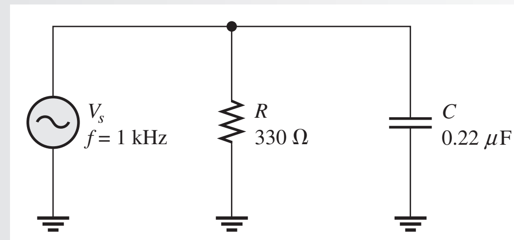
▶ **FIGURA 15–39**

Admitancia en un circuito *RC* en paralelo.

EJEMPLO 15–17

Para la figura 15-40, determine la admitancia total (**Y**) y luego conviértala a impedancia total (**Z**). Trace el diagrama fasorial de admitancia.

▶ **FIGURA 15–40**



Solución En la figura 15-40, $R = 330\ \Omega$; por tanto, $G = 1/R = 1/330\ \Omega = 3.03$ mS. La reactancia capacitiva es

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1000\ \text{Hz})(0.22\ \mu\text{F})} = 723\ \Omega$$

La magnitud de la susceptancia capacitiva es

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{723\ \Omega} = 1.38\ \text{mS}$$

La admitancia total es

$$\mathbf{Y}_{tot} = G + jB_C = \mathbf{3.03\ mS + \mathit{j}1.38\ mS}$$

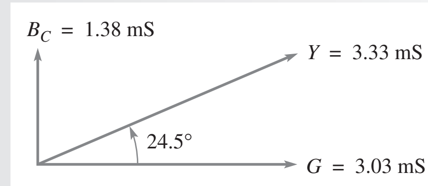
la cual se expresa en forma polar como

$$\mathbf{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(3.03\ \text{mS})^2 + (1.38\ \text{mS})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.38\ \text{mS}}{3.03\ \text{mS}}\right) = \mathbf{3.33\angle 24.5^\circ\ mS}$$

El diagrama fasorial de admitancia se muestra en la figura 15-41.

▶ **FIGURA 15–41**



Convierta la admitancia total a impedancia total como sigue:

$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{tot}} = \frac{1}{(3.33\angle 24.5°\ \text{mS})} = \mathbf{300\angle{-24.5°}\ \Omega}$$

Problema relacionado Para la figura 15-40, determine la admitancia total si f se incrementa a 2.5 kHz.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-5

1. Defina los términos *conductancia, susceptancia capacitiva*, y *admitancia*.
2. Si $Z = 100\ \Omega$, ¿cuál es el valor de Y?
3. En cierto circuito *RC* en paralelo, $R = 47\ \text{k}\Omega$ y $X_C = 75\ \text{k}\Omega$. Determine **Y**.
4. En la pregunta 3, ¿cuál es el valor de **Z**?

15–6 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RC* EN PARALELO

La ley de Ohm y la ley de la corriente de Kirchhoff se utilizan en el análisis de circuitos *RC*. Se examinan las relaciones de corriente y voltaje en un circuito *RC* dispuesto en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un circuito *RC* en paralelo**
  - Aplicar la ley de Ohm y la ley de la corriente de Kirchhoff a circuitos *RC* en paralelo
  - Expresar los voltajes y corrientes como cantidades fasoriales
  - Demostrar cómo varían la impedancia y el ángulo de fase con la frecuencia
  - Convertir de un circuito en paralelo a un circuito equivalente en serie

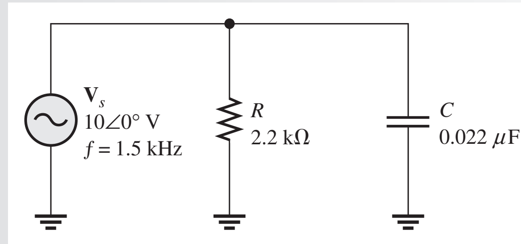
Por conveniencia, en el análisis de circuitos en paralelo, las fórmulas de la ley de Ohm previamente establecidas y que utilizan impedancia pueden ser reescritas para admitancia valiéndonos de la relación $Y = 1/Z$. Recuerde que el uso de letras no cursivas negritas indica cantidades fasoriales.

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{Y}}$$ **Ecuación 15–20**

$$\mathbf{I} = \mathbf{VY}$$ **Ecuación 15–21**

$$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{V}}$$ **Ecuación 15–22**

EJEMPLO 15–18 Determine la corriente total y el ángulo de fase en la figura 15-42. Trace un diagrama fasorial que muestre la relación de $\mathbf{V}_s$ e $\mathbf{I}_{tot}$.



▲ FIGURA 15–42

Solución La reactancia capacitiva es

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.5\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 4.82\text{ k}\Omega$$

La susceptancia capacitiva es

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{4.82\text{ k}\Omega} = 207\ \mu\text{S}$$

La magnitud de la conductancia es

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2.2\text{ k}\Omega} = 455\ \mu\text{S}$$

La admitancia total es

$$\mathbf{Y}_{tot} = G + jB_C = 455\ \mu\text{S} + j207\ \mu\text{S}$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(455\ \mu\text{S})^2 + (207\ \mu\text{S})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{207\ \mu\text{S}}{455\ \mu\text{S}}\right) = 500\angle 24.5°\ \mu\text{S}$$

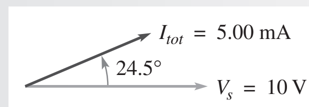
El ángulo de fase es de 24.5°.

Use la ley de Ohm para determinar la corriente total.

$$\mathbf{I}_{tot} = \mathbf{V}_s\mathbf{Y}_{tot} = (10\angle 0°\text{ V})(500\angle 24.5°\ \mu\text{S}) = \mathbf{5.00\angle 24.5°\ mA}$$

La magnitud de la corriente total es de 5.00 mA, y se adelanta en **24.5°** al voltaje aplicado, como lo indica el diagrama fasorial de la figura 15-43.

▶ FIGURA 15–43



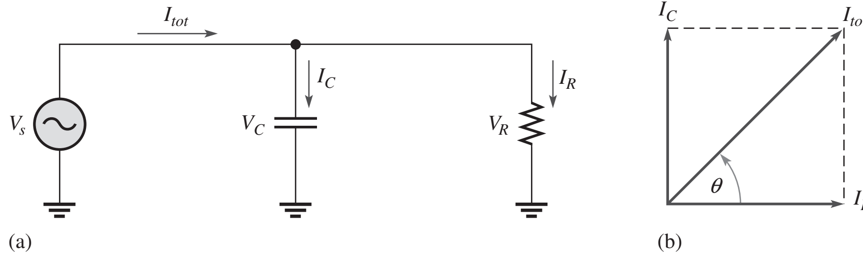
Problema relacionado ¿Cuál es la corriente total (en forma polar) si f se duplica?



Use el archivo Multisim E15-18 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Relaciones de fase de corrientes y voltajes

La figura 15-44(a) muestra todas las corrientes que circulan en un circuito *RC* básico dispuesto en paralelo. En la unión, la corriente total, I_{tot}, se divide en dos corrientes de rama, I_R e I_C. El voltaje aplicado, V_S, aparece tanto a través de las ramas resistivas como de las capacitivas, por tanto V_S, V_R y V_C están en fase y su magnitud es igual.



▲ **FIGURA 15–44**

Corrientes en un circuito *RC* en paralelo. Las direcciones de corriente mostradas en (a) son instantáneas y, desde luego, se invierten cuando el voltaje de fuente se invierte.

La corriente a través del resistor está en fase con el voltaje. La corriente a través del capacitor aparece adelantada en 90° con respecto al voltaje, y por tanto con respecto a la corriente resistiva. Conforme a la ley de la corriente de Kirchhoff, la corriente total es la suma fasorial de las dos corrientes de rama, como indica el diagrama fasorial de la figura 15-44(b). La corriente total se expresa como

$$\mathbf{I}_{tot} = I_R + jI_C$$ **Ecuación 15–23**

Esta ecuación se expresa en forma polar como

$$\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right)$$ **Ecuación 15–24**

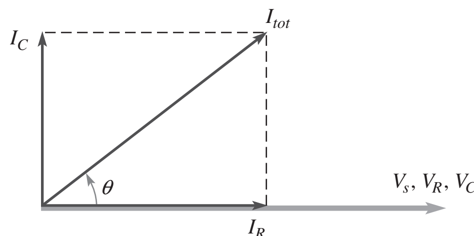
donde la magnitud de la corriente total es

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

y el ángulo de fase entre la corriente a través del resistor y la corriente total es

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right)$$

Como la corriente a través del resistor y el voltaje aplicado están en fase, θ representa asimismo el ángulo de fase entre la corriente total y el voltaje aplicado. La figura 15-45 muestra un diagrama fasorial completo de corriente y voltaje.

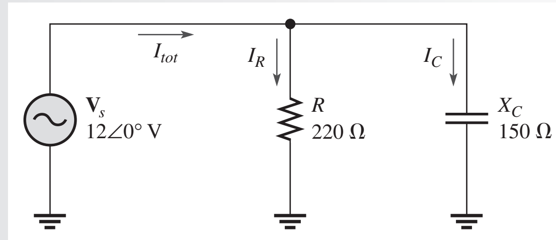


▲ **FIGURA 15–45**

Diagrama fasorial de corriente y voltaje de un circuito *RC* en paralelo (las amplitudes son arbitrarias).

EJEMPLO 15–19 Determine el valor de cada corriente mostrada en la figura 15-46, y describa la relación fasorial de cada corriente con el voltaje aplicado. Trace el diagrama fasorial de la corriente.

▶ FIGURA 15–46



Solución La corriente a través del resistor, la corriente a través del capacitor, y la corriente total se expresan como sigue:

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{R}} = \frac{12\angle 0^\circ\text{ V}}{220\angle 0^\circ\ \Omega} = \mathbf{54.5\angle 0^\circ\ mA}$$

$$\mathbf{I}_C = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{X}_C} = \frac{12\angle 0^\circ\text{ V}}{150\angle -90^\circ\ \Omega} = \mathbf{80\angle 90^\circ\ mA}$$

$$\mathbf{I}_{tot} = I_R + jI_C = 54.5\text{ mA} + j80\text{ mA}$$

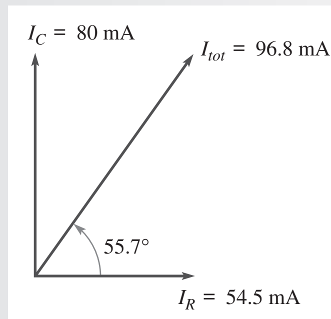
Al convertir $\mathbf{I}_{tot}$ a forma polar se obtiene

$$\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{I_C}{I_R}\right)$$

$$= \sqrt{(54.5\text{ mA})^2 + (80\text{ mA})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{80\text{ mA}}{54.5\text{ mA}}\right) = \mathbf{96.8\angle 55.7^\circ\ mA}$$

Tal como ilustran los resultados, la corriente a través del resistor es de 54.5 mA y está en fase con el voltaje. La corriente a través del capacitor es de 80 mA y va 90° adelante del voltaje. La corriente total es de 96.8 mA y adelanta en 55.7° al voltaje. El diagrama fasorial de la figura 15-47 muestra estas relaciones.

▶ FIGURA 15–47



Problema relacionado En un circuito en paralelo, $\mathbf{I}_R = 100\angle 0^\circ$ mA e $\mathbf{I}_C = 60\angle 90^\circ$ mA. Determine la corriente total.

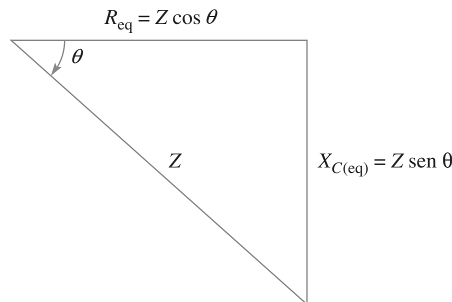
Conversión de la forma en paralelo a la forma en serie

Para cada circuito *RC* dispuesto en paralelo, existe un circuito *RC* equivalente en serie para una frecuencia dada. Dos circuitos se consideran equivalentes cuando ambos presentan una impedancia igual en sus terminales; es decir, que la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase son idénticos.

Con el fin de obtener el circuito en serie equivalente para determinado circuito *RC* en paralelo, primero se determinan la impedancia y el ángulo de fase del circuito en paralelo. Luego se utilizan los valores de Z y θ para construir un triángulo de impedancia, mostrado en la figura 15-48. Los lados vertical y horizontal del triángulo representan la resistencia equivalente en serie y la reactancia capacitiva como se indica. Estos valores se calculan aplicando las siguientes relaciones trigonométricas:

$$R_{eq} = Z\cos\theta \quad \textbf{Ecuación 15–25}$$

$$X_{C(eq)} = Z\,\text{sen}\,\theta \quad \textbf{Ecuación 15–26}$$

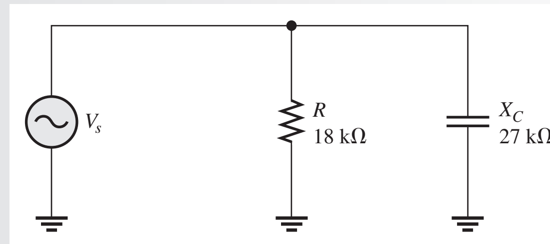


◀ **FIGURA 15–48**

Triángulo de impedancia del equivalente en serie de un circuito *RC* en paralelo. Z y θ son los valores conocidos del circuito en paralelo. R_{eq} y $X_{C(eq)}$ son los valores equivalentes en serie.

EJEMPLO 15–20 Convierta el circuito en paralelo de la figura 15-49 a una forma dispuesta en serie.

▶ **FIGURA 15–49**



Solución Primero, determine la admitancia del circuito en paralelo como sigue:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{18\text{ k}\Omega} = 55.6\ \mu\text{S}$$

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{27\text{ k}\Omega} = 37.0\ \mu\text{S}$$

$$\mathbf{Y} = G + jB_C = 55.6\ \mu\text{S} + j37.0\ \mu\text{S}$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Y} = \sqrt{G^2 + B_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(55.6\ \mu\text{S})^2 + (37.0\ \mu\text{S})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{37.0\ \mu\text{S}}{55.6\ \mu\text{S}}\right) = 66.8\angle 33.6°\ \mu\text{S}$$

Entonces, la impedancia total es

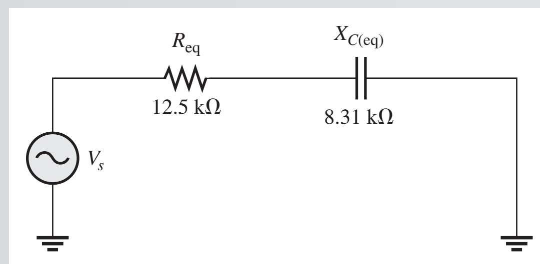
$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}} = \frac{1}{66.8\angle 33.6°\ \mu\text{S}} = 15.0\angle -33.6°\text{ k}\Omega$$

Al convertir a forma rectangular se obtiene

$$\mathbf{Z}_{tot} = Z\cos\theta - jZ\,\text{sen}\,\theta = R_{eq} - jX_{C(eq)}$$

$$= 15.0\,\text{k}\Omega\cos(-33.6°) - j15.0\,\text{k}\Omega\,\text{sen}(-33.6°) = 12.5\,\text{k}\Omega - j8.31\,\text{k}\Omega$$

El circuito *RC* equivalente en serie es un resistor de 12.5 kΩ en serie con una reactancia capacitiva de 8.31 kΩ. Esto se muestra en la figura 15-50.



▲ **FIGURA 15–50**

Problema relacionado La impedancia de un circuito *RC* en paralelo es $\mathbf{Z} = 10\angle -26°$ kΩ. Convierta este circuito a uno equivalente en serie.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-6

1. La admitancia de un circuito *RC* es de 3.50 mS, y el voltaje aplicado es de 6 V. ¿Cuál es la corriente total?
2. En cierto circuito *RC* en paralelo, la corriente a través del resistor es de 10 mA y la corriente a través del capacitor es de 15 mA. Determine la magnitud y el ángulo de fase de la corriente total. ¿Este ángulo de fase se mide con respecto a qué?
3. En un circuito *RC* en paralelo, ¿cuál es el ángulo de fase entre la corriente a través del capacitor y el voltaje aplicado?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de los circuitos reactivos en paralelo continúa en el capítulo 16, parte 2, en la página 691.

Parte 3

CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

15–7 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RC* EN SERIE-PARALELO

Los conceptos estudiados con respecto a circuitos dispuestos en serie-paralelo se utilizan para analizar circuitos que tienen combinaciones de componentes *R* y *C* tanto en serie como en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

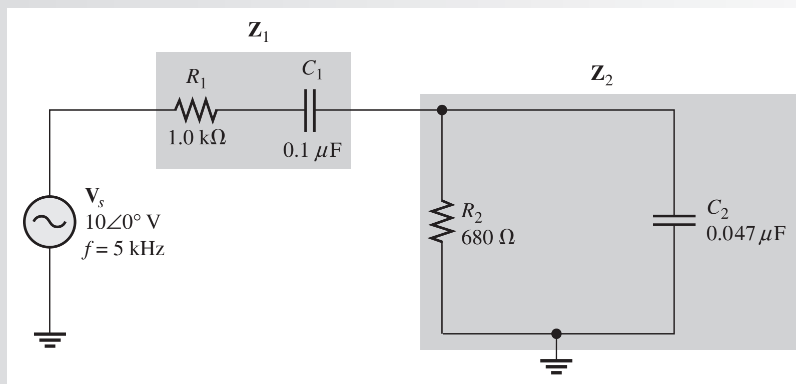
- **Analizar circuitos *RC* en serie-paralelo**
  - Determinar la impedancia total
  - Calcular corrientes y voltajes
  - Medir impedancia y ángulo de fase

La impedancia de componentes dispuestos en serie es más fácil de expresar en forma rectangular, y la impedancia de componentes dispuestos en paralelo se encuentra mejor utilizando la forma polar. Los pasos para analizar un circuito con un componente en serie y un componente en paralelo se ilustran en el ejemplo 15-21. Primero se expresa la impedancia de la parte en serie del circuito en forma rectangular y la impedancia de la parte en paralelo en forma polar. A continuación, se convierte la impedancia de la parte en paralelo a forma rectangular y se le suma a la impedancia de la parte en serie. Una vez determinada la forma rectangular de la impedancia total, puede ser convertida a forma polar para conocer la magnitud y el ángulo de fase y calcular la corriente.

EJEMPLO 15–21 En el circuito de la figura 15-51, determine lo siguiente:

(a) impedancia total **(b)** corriente total **(c)** ángulo de fase en el cual I_{tot} adelanta a V_s

▶ FIGURA 15–51



Solución **(a)** Primero, calcule las magnitudes de la reactancia capacitiva

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(5\text{ kHz})(0.1\ \mu\text{F})} = 318\ \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(5\text{ kHz})(0.047\ \mu\text{F})} = 677\ \Omega$$

Un método es encontrar la impedancia de la parte en serie y la impedancia de la parte en paralelo y combinarlas para obtener la impedancia total. La impedancia de la combinación en serie de R_1 y C_1 es

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 1.0\text{ k}\Omega - j318\ \Omega$$

Para determinar la impedancia de la parte en paralelo, encuentre primero la admitancia de la combinación en paralelo de R_2 y C_2.

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{680\ \Omega} = 1.47\text{ mS}$$

$$B_{C2} = \frac{1}{X_{C2}} = \frac{1}{677\ \Omega} = 1.48\text{ mS}$$

$$\mathbf{Y}_2 = G_2 + jB_{C2} = 1.47\text{ mS} + j1.48\text{ mS}$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Y}_2 = \sqrt{G_2^2 + B_{C2}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{B_{C2}}{G_2}\right)$$

$$= \sqrt{(1.47\text{ mS})^2 + (1.48\text{ mS})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.48\text{ mS}}{1.47\text{ mS}}\right) = 2.09\angle 45.2^\circ\text{ mS}$$

Entonces, la impedancia de la parte en paralelo es

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{1}{\mathbf{Y}_2} = \frac{1}{2.09\angle 45.2^\circ\text{ mS}} = 478\angle -45.2^\circ\ \Omega$$

Al convertir a forma rectangular se obtiene

$$\mathbf{Z}_2 = Z_2\cos\theta - jZ_2\text{sen}\,\theta$$

$$= (478\ \Omega)\cos(-45.2^\circ) - j(478\ \Omega)\text{sen}(-45.2^\circ) = 337\ \Omega - j339\ \Omega$$

La parte en serie y la parte en paralelo están en serie entre sí. Combine $\mathbf{Z}_1$ y $\mathbf{Z}_2$ para obtener la impedancia total.

$$\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$$

$$= (1.0\text{ k}\Omega - j318\ \Omega) + (337\ \Omega - j339\ \Omega) = 1337\ \Omega - j657\ \Omega$$

Al expresar $\mathbf{Z}_{tot}$ en forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z}_{tot} = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)$$

$$= \sqrt{(1338\ \Omega)^2 + (657\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{657\ \Omega}{1337\ \Omega}\right) = \mathbf{1.49\angle -26.2^\circ\ k\Omega}$$

(b) Use la ley de Ohm para determinar la corriente total.

$$\mathbf{I}_{tot} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_{tot}} = \frac{10\angle 0^\circ\text{ V}}{1.49\angle -26.2^\circ\text{ k}\Omega} = \mathbf{6.71\angle 26.2^\circ\ mA}$$

(c) La corriente total adelanta en **26.2°** al voltaje aplicado.

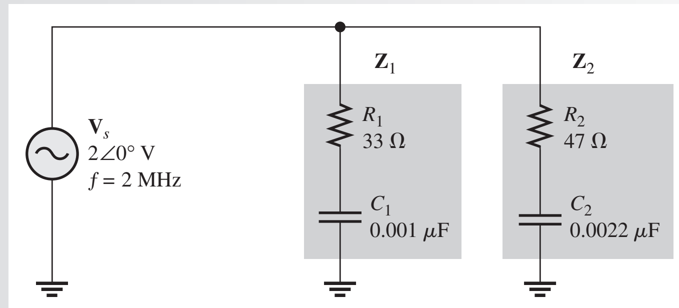
Problema relacionado En la figura 15-51, determine los voltajes a través de $\mathbf{Z}_1$ y $\mathbf{Z}_2$ y expréselos en forma polar.



Use el archivo Multisim E15-21 para verificar los resultados obtenidos en la parte (b) de este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

El ejemplo 15-22 muestra dos conjuntos de componentes en serie en paralelo. El método es expresar primero cada impedancia de rama en forma rectangular y luego convertir cada una de estas impedancias a forma polar. A continuación, se calcula cada corriente de rama utilizando notación polar. Una vez que se conocen las corrientes de rama, se puede encontrar la corriente total sumando las dos corrientes de rama en forma rectangular. En este caso particular, no se requiere la impedancia total.

EJEMPLO 15–22 Determine todas las corrientes mostradas en la figura 15-52. Trace un diagrama fasorial de corriente.



▲ FIGURA 15–52

Solución Primero, calcule X_{C1} y X_{C2}.

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(2\text{ MHz})(0.001\ \mu\text{F})} = 79.6\ \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(2\text{ MHz})(0.0022\ \mu\text{F})} = 36.2\ \Omega$$

A continuación, determine la impedancia de cada una de las dos ramas dispuestas en paralelo.

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 33\ \Omega - j79.6\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = R_2 - jX_{C2} = 47\ \Omega - j36.2\ \Omega$$

Convierta estas impedancias a forma polar.

$$\mathbf{Z}_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{C1}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{C1}}{R_1}\right)$$

$$= \sqrt{(33\ \Omega)^2 + (79.6\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{79.6\ \Omega}{33\ \Omega}\right) = 86.2\angle -67.5^\circ\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{C2}}{R_2}\right)$$

$$= \sqrt{(47\ \Omega)^2 + (36.2\ \Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{36.2\ \Omega}{47\ \Omega}\right) = 59.3\angle -37.6^\circ\ \Omega$$

Calcule cada corriente de rama

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_1} = \frac{2\angle 0^\circ\ \text{V}}{86.2\angle -67.5^\circ\ \Omega} = \mathbf{23.2\angle 67.5^\circ\ mA}$$

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_2} = \frac{2\angle 0^\circ\ \text{V}}{59.3\angle -37.6^\circ\ \Omega} = \mathbf{33.7\angle 37.6^\circ\ mA}$$

Para obtener la corriente total, exprese cada corriente de rama en forma rectangular de modo que pueda sumarlas.

$$\mathbf{I}_1 = 8.89\ \text{mA} + j21.4\ \text{mA}$$
$$\mathbf{I}_2 = 26.7\ \text{mA} + j20.6\ \text{mA}$$

La corriente total es

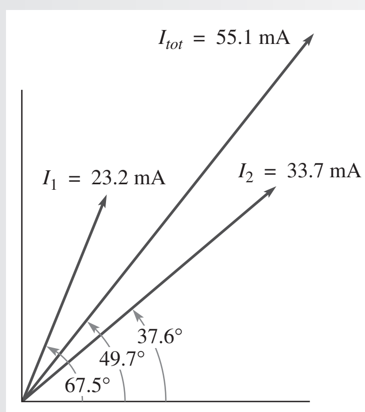
$$\mathbf{I}_{tot} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2$$
$$= (8.89\ \text{mA} + j21.4\ \text{mA}) + (26.7\ \text{mA} + j20.6\ \text{mA}) = 35.6\ \text{mA} + j42.0\ \text{mA}$$

Al convertir I_{tot} a forma polar se obtiene

$$\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{(35.6\ \text{mA})^2 + (42.0\ \text{mA})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{42.0\ \Omega}{35.6\ \Omega}\right) = \mathbf{55.1\angle 49.7^\circ\ mA}$$

El diagrama fasorial de corriente se muestra en la figura 15-53.

▶ FIGURA 15–53



Problema relacionado Determine el voltaje a través de cada uno de los componentes que aparecen en la figura 15-52, y luego trace un diagrama fasorial de voltaje.

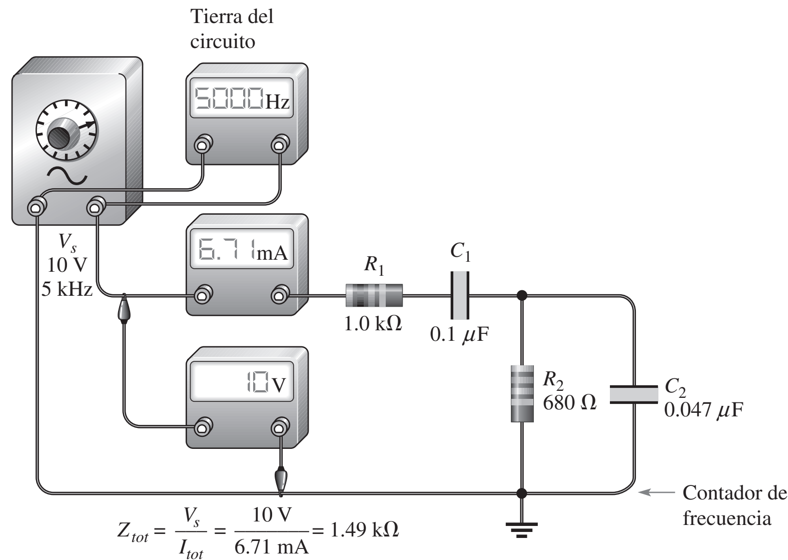


Use el archivo Multisim E15-22 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

Medición de Z_{tot}

Ahora, se verá cómo determinar el valor de Z_{tot} para cada uno de los circuitos del ejemplo 15-21 por medio de mediciones. Primero, se mide la impedancia total en la forma descrita por los siguientes pasos y como se ilustra en la figura 15-54 (otras formas también son posibles):

Paso 1. Con un generador de ondas seno, ajuste el voltaje de fuente a un valor conocido (10 V) y la frecuencia a 5 kHz. Si el generador no es muy preciso, entonces conviene verificar el voltaje con un voltímetro de ca y la frecuencia con un contador de frecuencia en lugar de confiar en los valores marcados en los controles del generador.



◀ **FIGURA 15–54**

Determinación de Z_{tot} empleando medición de V_s e I_{tot}.

Paso 2. Conecte un amperímetro de ca como se muestra en la figura 15-54, y mida la corriente total. De modo alternativo, se puede medir el voltaje a través de R_1 con un voltímetro y calcular la corriente.

Paso 3. Determine la impedancia total aplicando la ley de Ohm.

Medición del ángulo de fase, θ

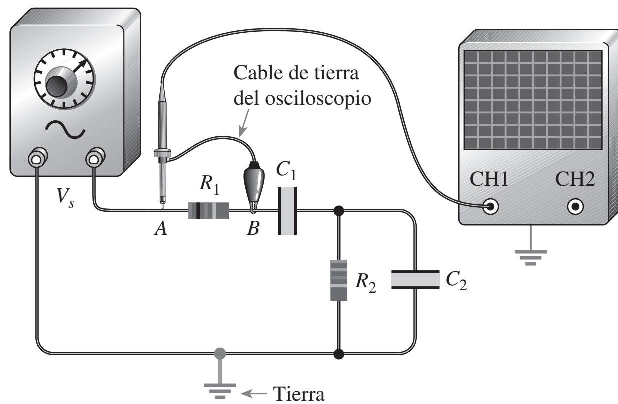
Para medir el ángulo de fase, el voltaje de la fuente y la corriente total deben aparecer en la pantalla del osciloscopio en la relación de tiempo apropiada. Dos tipos básicos de puntas de prueba están disponibles para medir las cantidades con un osciloscopio: la punta de prueba de voltaje y la punta de prueba de corriente. La punta de prueba de corriente es un dispositivo conveniente, pero a menudo no tan disponible como el de voltaje. La técnica de medición de fase se limitará al uso de puntas de prueba de voltaje junto con el osciloscopio. Aunque existen métodos de aislamiento especiales, una punta de prueba de voltaje tiene dos puntas que se conectan al circuito: la de detección y la de tierra. Por tanto, todas las mediciones de voltaje deben ser referidas a tierra.

Como sólo se tienen que utilizar puntas de prueba de voltaje, no es posible medir la corriente directamente. Sin embargo, para mediciones de fase, el voltaje a través de R_1 está en fase con la corriente total y puede ser utilizado para establecer el ángulo de fase de la corriente.

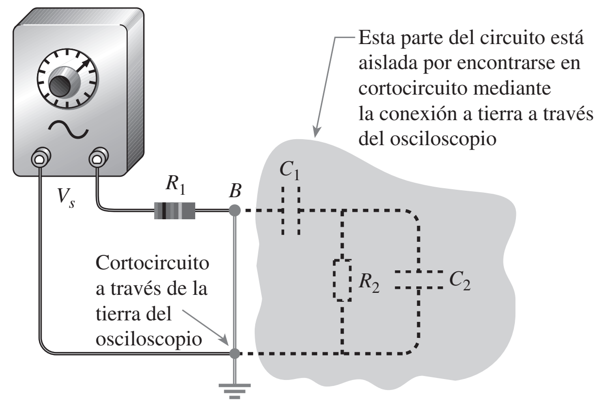
Antes de proseguir con la medición de fase, se presenta un problema con el despliegue en pantalla de V_{R1}. Si la punta de prueba del osciloscopio se conecta a través del resistor, tal como indica la figura 15-55(a), la punta de tierra del osciloscopio conectará a tierra el punto *B*, evitando así al resto de los componentes y separándolos eléctricamente del circuito, como se ilustra en la figura 15-55(b) (suponiendo que el osciloscopio no está aislado de la tierra de la línea de potencia).

Para evitar este problema, se pueden intercambiar las terminales de salida del generador de modo que un extremo de R_1 esté conectado a la terminal de tierra, figura 15-56(a). Ahora se puede conectar el osciloscopio entre sus extremos para que muestre en pantalla a V_{R1}, figura 15-56(b). la otra punta de prueba se conecta entre las terminales de la fuente de voltaje para mostrar en pantalla V_s como se indica. Ahora el canal 1 del osciloscopio tiene a V_{R1} como entrada, y el canal 2 tiene a V_s. El disparo de barrido del osciloscopio deberá ser activado a partir del voltaje de fuente (el canal 2 en este caso).

Antes de conectar las puntas de prueba al circuito, se deberán alinear las dos líneas horizontales (trazos) de modo que aparezcan como una sola línea de un lado a otro de la pantalla del osciloscopio. Para ello, se conectan a tierra las puntas de prueba de detección y se ajustan las perillas de posición vertical para mover los trazos hacia la línea central de la pantalla hasta que estén superpuestos. Este procedimiento garantiza que ambas formas de onda tengan el mismo cruce por cero para medir la fase con precisión.



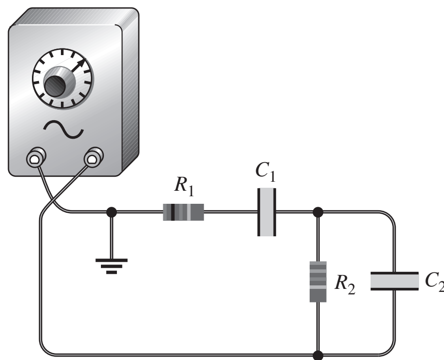
(a) El cable de tierra de la punta de prueba del osciloscopio conecta a tierra el punto *B*



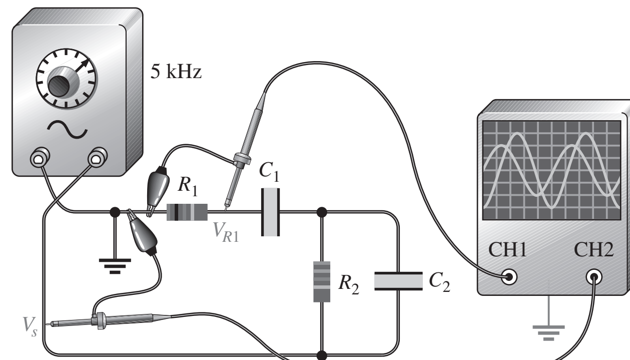
(b) El efecto de conectar a tierra el punto *B* es aislar el resto del circuito

▲ **FIGURA 15–55**

Efectos de una medición directa entre las terminales de un componente cuando el instrumento y el circuito están conectados a tierra.



(a) Tierra reposicionada para que un extremo de R_1 esté conectado a tierra



(b) El osciloscopio muestra V_{R1} y V_s. V_{R1} representa la fase de la corriente total

▲ **FIGURA 15–56**

Reposicionamiento de la tierra para medir el voltaje directamente con respecto a tierra sin aislar una parte del circuito por conexión a tierra.

Una vez que se estabilizan las formas de onda en la pantalla, es posible medir el periodo del voltaje de fuente. A continuación, se utilizan los controles Volts/Div para ajustar las amplitudes de las formas de onda hasta que parezca que ambas tienen la misma amplitud. Ahora, las formas de onda se esparcen horizontalmente con el control Sec/Div para ampliar la distancia entre ellas. Esta distancia horizontal representa el tiempo que hay entre las dos formas de onda. La cantidad de divisiones presentes entre las formas de onda a lo largo de cualesquiera líneas horizontales a causa del ajuste de Sec/Div es igual al tiempo que hay entre ellas, Δt. Además, se pueden utilizar los cursores para determinar Δt si el osciloscopio dispone de esta función.

Una vez determinados el periodo, T, y el tiempo entre las formas de onda, Δt, se puede calcular el ángulo de fase con la siguiente ecuación:

Ecuación 15–27

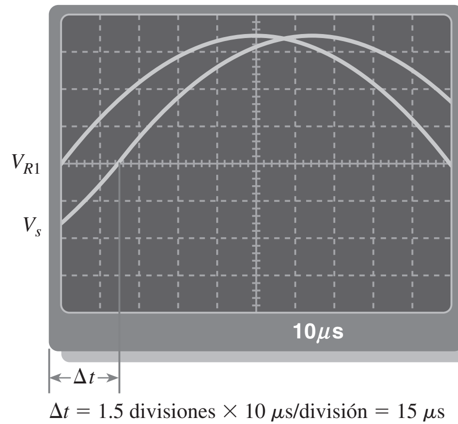
$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360^\circ$$

En la figura 15-57 se muestra un ejemplo de visualización en pantalla. En esta imagen, hay 1.5 divisiones horizontales entre las dos formas de onda, como se indica, y el control Sec/Div está ajustado a 10 μs. El periodo de estas formas de onda es de 200 μs y el Δt es

$$\Delta t = 1.5 \text{ divisiones} \times 10\ \mu\text{s/división} = 15\ \mu\text{s}$$

El ángulo de fase es

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360^\circ = \left(\frac{15\ \mu\text{s}}{200\ \mu\text{s}}\right)360^\circ = 27^\circ$$



◀ **FIGURA 15–57**

Determinación del ángulo de fase en el osciloscopio.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-7

1. ¿Cuál es el circuito RC equivalente en serie al circuito en serie-paralelo mostrado en la figura 15-51?
2. ¿Cuál es la impedancia total en forma polar del circuito mostrado en la figura 15-52?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de circuitos reactivos en serie-paralelo continúa en el capítulo 16, parte 3, en la página 698.

Parte 4

Temas especiales

15–8 Potencia en circuitos *RC*

En un circuito de ca puramente resistivo, la resistencia disipa toda energía suministrada por la fuente en forma de calor. En un circuito de ca puramente capacitivo, el capacitor guarda toda energía suministrada por la fuente durante una parte del ciclo de voltaje y luego la regresa a la fuente durante otra parte del ciclo, de modo que no hay conversión de energía en calor. Cuando hay tanto resistencia como capacitancia, ésta guarda y regresa alternadamente una parte de la energía y la resistencia disipa otra parte. Los valores relativos de resistencia y reactancia capacitiva determinan la cantidad de energía convertida en calor.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la potencia en circuitos *RC***
  - Explicar los conceptos de potencia real y potencia reactiva
  - Trazar el triángulo de potencia
  - Definir el término *factor de potencia*
  - Explicar el concepto de potencia aparente
  - Calcular potencia en un circuito *RC*

Cuando en un circuito *RC* dispuesto en serie la resistencia es más grande que la reactancia capacitiva, la resistencia convierte en calor más de la energía total suministrada por la fuente que la guardada por el capacitor. Asimismo, cuando la reactancia es mayor que la resistencia, más de la energía total es guardada y regresada que la convertida en calor.

Las fórmulas para el cálculo de la potencia en un resistor, en ocasiones llamada *potencia real* (P_{real}), y la potencia en un capacitor, llamada *potencia reactiva* (P_r), se establecen de nuevo aquí. La unidad de potencia real es el watt, y la unidad de potencia reactiva es el VAR (volt-ampere reactivo).

Ecuación 15–28

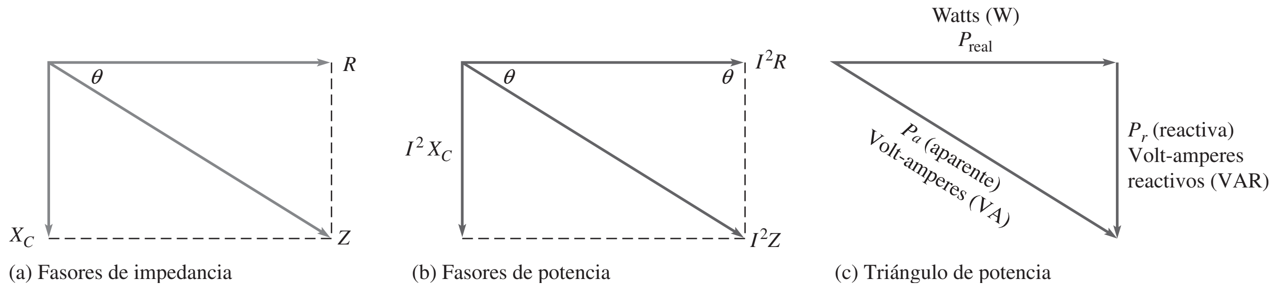
$$P_{real} = I^2R$$

Ecuación 15–29

$$P_r = I^2X_C$$

El triángulo de potencia para circuitos *RC*

En la figura 15-58(a) se muestra un diagrama fasorial de impedancia generalizada para un circuito *RC* dispuesto en serie. Un diagrama similar también puede representar una relación fasorial en el caso de potencias porque las magnitudes respectivas de éstas, P_{real} y P_r, difieren de R y X_C por un factor de I^2. Esto se muestra en la figura 15-58(b).



(a) Fasores de impedancia (b) Fasores de potencia (c) Triángulo de potencia

▲ **FIGURA 15–58**

Desarrollo del triángulo de potencia para un circuito *RC* en serie.

El fasor de potencia resultante, I^2Z, representa la **potencia aparente, $\mathbf{P_a}$**. En cualquier instante, P_a es la potencia total que aparentemente se transfiere entre la fuente y el circuito *RC*. La unidad de potencia aparente es el volt-ampere, VA. La expresión para potencia aparente es

$$P_a = I^2Z$$ **Ecuación 15–30**

El diagrama fasorial de potencia mostrado en la figura 15-58(b) puede ser reacomodado en la forma de un triángulo rectángulo, como se muestra en la figura 15-58(c). Éste se llama *triángulo de potencia*. Empleando las reglas de trigonometría, P_{real} se expresa como

$$P_{real} = P_a \cos\theta$$

Dado que P_a es igual a I^2Z o VI, la ecuación para la disipación de potencia real en un circuito *RC* se escribe como

$$P_{real} = VI\cos\theta$$ **Ecuación 15–31**

donde V es el voltaje aplicado e I es la corriente total.

En el caso de una corriente puramente resistiva, $\theta = 0°$ y $\cos 0° = 1$, por tanto P_{real} iguala a VI. Para el caso de un circuito puramente capacitivo, $\theta = 90°$ y $\cos 90° = 0$, de modo que P_{real} es de cero. Como ya se sabe, no hay disipación de potencia en un capacitor ideal.

El factor de potencia

El término $\cos\theta$ se llama **factor de potencia** y se establece como

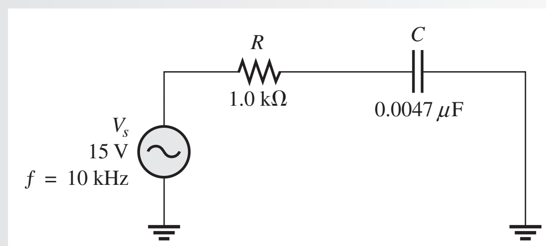
$$PF = \cos\theta$$ **Ecuación 15–32**

Conforme el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total se incrementa, el factor de potencia disminuye, lo cual indica la existencia de un circuito crecientemente reactivo. Mientras más pequeño es el factor de potencia, más pequeña es la disipación de potencia.

El factor de potencia puede variar desde 0 para el caso de un circuito puramente reactivo hasta 1 en el caso de un circuito puramente resistivo. En un circuito *RC*, el factor de potencia se conoce como factor de potencia de adelanto porque la corriente se adelanta al voltaje.

EJEMPLO 15–23 Determine el factor de potencia y la potencia real en el circuito de la figura 15-59.

▶ **FIGURA 15–59**



Solución La reactancia capacitiva es

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(0.0047\ \mu\text{F})} = 3.39\text{ k}\Omega$$

La impedancia total del circuito, en forma rectangular, es

$$\mathbf{Z} = R - jX_C = 1.0\text{ k}\Omega - j3.39\text{ k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (3.39\text{ k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{3.39\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 3.53\angle -73.6^\circ\text{ k}\Omega$$

El ángulo asociado con la impedancia es θ, que es el ángulo entre el voltaje aplicado y la corriente total; por consiguiente, el factor de potencia es

$$PF = \cos\theta = \cos(-73.6^\circ) = \mathbf{0.282}$$

La magnitud de la corriente es

$$I = \frac{V_s}{Z} = \frac{15\text{ V}}{3.53\text{ k}\Omega} = 4.25\text{ mA}$$

La potencia real es

$$P_{\text{real}} = V_sI\cos\theta = (15\text{ V})(4.25\text{ mA})(0.282) = \mathbf{18.0\ mW}$$

Problema relacionado ¿Cuál es el factor de potencia si f se reduce a la mitad en la figura 15-59?

Importancia de la potencia aparente

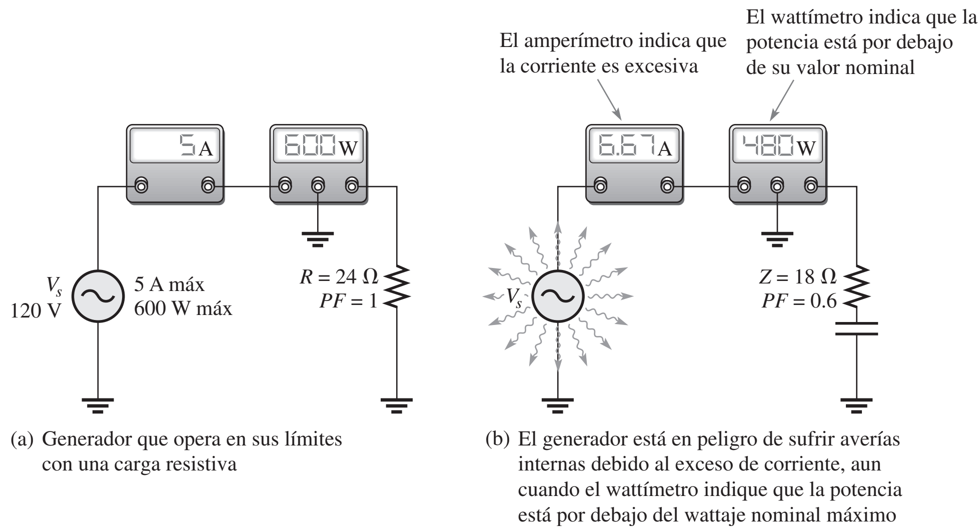
Como ya se mencionó, la potencia aparente es la potencia que aparentemente es transferida entre la fuente y la carga, y consta de dos componentes —un componente de potencia real y un componente de potencia reactiva.

En todos los sistemas eléctricos y electrónicos, la potencia real es la que realiza el trabajo. La potencia reactiva sólo se mueve alternadamente entre la fuente y la carga. De manera ideal, en función de la realización de trabajo útil, toda la potencia transferida a la carga deberá ser potencia real y nada de ella potencia reactiva. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones prácticas, la carga tiene algo de reactancia asociada, y por consiguiente hay que habérselas con ambos componentes de potencia.

En el capítulo 14 fue analizado el uso de potencia aparente en relación con transformadores. Para cualquier carga reactiva, existen dos componentes de la corriente total: el componente resistivo y el componente reactivo. Si en una carga únicamente se considera la potencia real (watts), sólo se estará considerando una parte de la corriente total que la carga demanda de una fuente. Para tener una idea real de la corriente que una carga demandará, se debe considerar la potencia aparente (VA).

Una fuente del tipo de un generador de ca es capaz de suministrar corriente a una carga hasta cierto valor máximo. Si la carga demanda más que este valor máximo, la fuente puede sufrir averías. La figura 15-60(a) muestra un generador de 120 V que puede suministrar una corriente máxima de 5 A a una carga. Supongamos que la capacidad del generador es de 600 W y se conecta a una carga puramente resistiva de 24 Ω (factor de potencia de 1). El amperímetro indica que la corriente es de 5 A, y el wattímetro señala una potencia de 600 W. El generador no tiene problemas en estas condiciones, aunque está operando a corriente y potencia máximas.

Ahora, considere lo que sucede si la carga se cambia por una carga reactiva con impedancia de 18 Ω y factor de potencia de 0.6, como indica la figura 15-60(b). La corriente es de 120 V/18 Ω



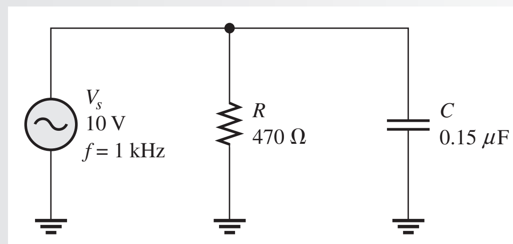
▲ **FIGURA 15–60**

El wattaje nominal de una fuente es inapropiado cuando la carga es reactiva. La potencia nominal deberá estar en VA y no en watts.

= 6.67 A, la cual *excede* la corriente máxima. Aunque el wattímetro lee 480 W, lo cual es menor que la potencia nominal del generador, la corriente excesiva probablemente provocará averías. Esta ilustración muestra que la potencial nominal real puede resultar engañosa e inapropiada para fuentes de ca. La capacidad nominal del generador de ca deberá ser de 600 VA, una clasificación de capacidad que los fabricantes utilizan en general, en lugar de 600 W.

EJEMPLO 15–24 Para el circuito de la figura 15-61, encuentre la potencia real, la potencia reactiva, y la potencia aparente.

▶ **FIGURA 15–61**



Solución La reactancia capacitiva y las corrientes a través de R y C son

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1000\text{ Hz})(0.15\ \mu\text{F})} = 1061\ \Omega$$

$$I_R = \frac{V_s}{R} = \frac{10\text{ V}}{470\ \Omega} = 21.3\text{ mA}$$

$$I_C = \frac{V_s}{X_C} = \frac{10\text{ V}}{1061\ \Omega} = 9.43\text{ mA}$$

La potencia real es

$$P_{\text{real}} = I_R^2 R = (21.3\text{ mA})^2(470\ \Omega) = \mathbf{213\ mW}$$

La potencia reactiva es

$$P_r = I_C^2 X_C = (9.43\text{ mA})^2(1061\ \Omega) = \mathbf{94.3\ mVAR}$$

La potencia aparente es

$$P_a = \sqrt{P_{\text{real}}^2 + P_r^2} = \sqrt{(213\text{ mW})^2 + (94.3\text{ mVAR})^2} = \mathbf{233\ mVA}$$

Problema relacionado ¿Cuál es la potencia real en la figura 15-61 cuando se cambia la frecuencia a 2 kHz?

REPASO DE LA SECCIÓN 15-8

1. **¿A qué componente de un circuito *RC* se debe la disipación de potencia?**
2. **El ángulo de fase, θ, es de 45°. ¿Cuál es el factor de potencia?**
3. **Un circuito *RC* en serie tiene los siguientes valores de parámetros: $R = 330\ \Omega$, $X_C = 460\ \Omega$, e $I = 2\ A$. Determine la potencia real, la potencia reactiva, y la potencia aparente.**

15–9 APLICACIONES BÁSICAS

Los circuitos *RC* se encuentran en diversas aplicaciones, a menudo como parte de un circuito más complejo. Tres aplicaciones son los osciladores de desplazamiento de fase, los circuitos selectores de frecuencia (filtros), y el acoplamiento de ca.

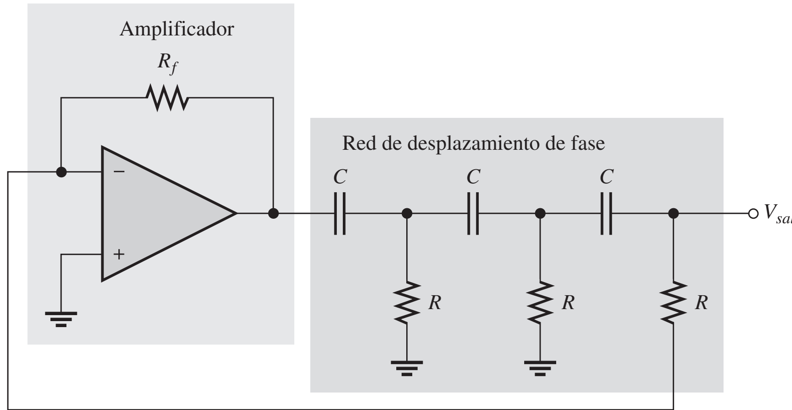
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Examinar algunas aplicaciones básicas de los circuitos *RC***
  - Examinar la forma en que se utiliza el circuito *RC* como oscilador
  - Examinar cómo opera el circuito *RC* como filtro
  - Analizar el acoplamiento de ca

El oscilador de desplazamiento de fase

Como ya se sabe, un circuito *RC* en serie desplazará la fase del voltaje de salida en una cantidad que depende de los valores de *R* y *C* y de la frecuencia de la señal. Esta habilidad de desplazamiento de fase que depende de la frecuencia es vital en ciertos circuitos osciladores de retroalimentación. Un **oscilador** es un circuito que genera una forma de onda periódica, y resulta muy importante en muchos sistemas electrónicos. Se estudiarán los osciladores en cursos de dispositivos, por lo cual aquí el enfoque se concentra en la aplicación de circuito *RC* para desplazamiento de fase. El requerimiento es que una fracción de la salida del oscilador sea regresada hacia la entrada (llamada "retroalimentación") en la fase apropiada para reforzar la entrada y mantener las oscilaciones. Por regla general, el requerimiento es retroalimentar la señal con un total de 180° de desplazamiento de fase.

Un solo circuito *RC* se limita a desplazamientos de fase de menos de 90°. El circuito *RC* básico de retraso abordado en la sección 15-4 puede ser "apilado" para formar un red *RC* más compleja como se ilustra en la figura 15-62, la cual muestra un circuito específico llamado oscilador de desplazamiento de fase. El oscilador de desplazamiento de fase utiliza en general tres circuitos *RC* iguales que producen el desplazamiento de fase de 180° requerido a cierta frecuencia, la



▲ **FIGURA 15–62**

Oscilador de desplazamiento de fase.

cual será la frecuencia a la cual trabaje el oscilador. La fase de salida del amplificador es desplazada por la red *RC* y regresada hacia la entrada del amplificador, el cual genera la suficiente ganancia como para mantener las oscilaciones.

El proceso de juntar varios circuitos *RC* produce un efecto de carga, así que el desplazamiento de fase total no equivale a simplemente sumar los desplazamientos de fase de los circuitos *RC* individuales. El cálculo detallado para este circuito aparece en el apéndice B. Con componentes iguales, la frecuencia a la cual ocurre el desplazamiento de fase de 180° está dada por la ecuación

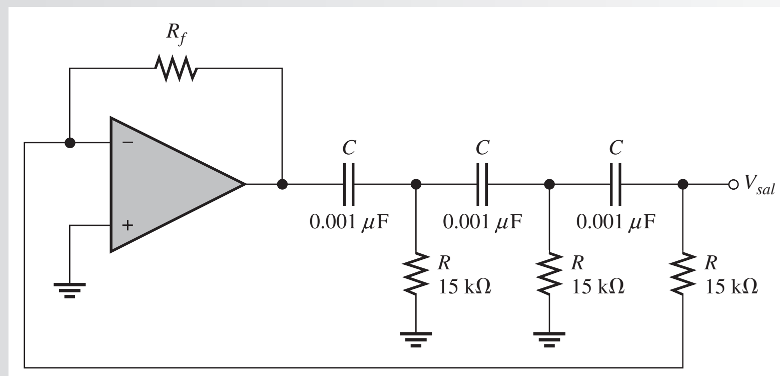
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}\,RC}$$

Ecuación 15–33

También resulta que la red *RC* atenúa (reduce) la señal del amplificador por un factor de 29; el amplificador debe compensar esta atenuación con una ganancia de −29 (el signo menos toma en cuenta el desplazamiento de fase).

EJEMPLO 15–25 En la figura 15-63, calcule la frecuencia de salida.

▶ **FIGURA 15–63**



Solución

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}\,RC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}\,(15\text{ k}\Omega)(0.001\ \mu\text{F})} = 4.33\text{ kHz}$$

Problema relacionado Si todos los capacitores se cambian a 0.0027 μF, ¿cuál es la frecuencia del oscilador?

El circuito *RC* como filtro

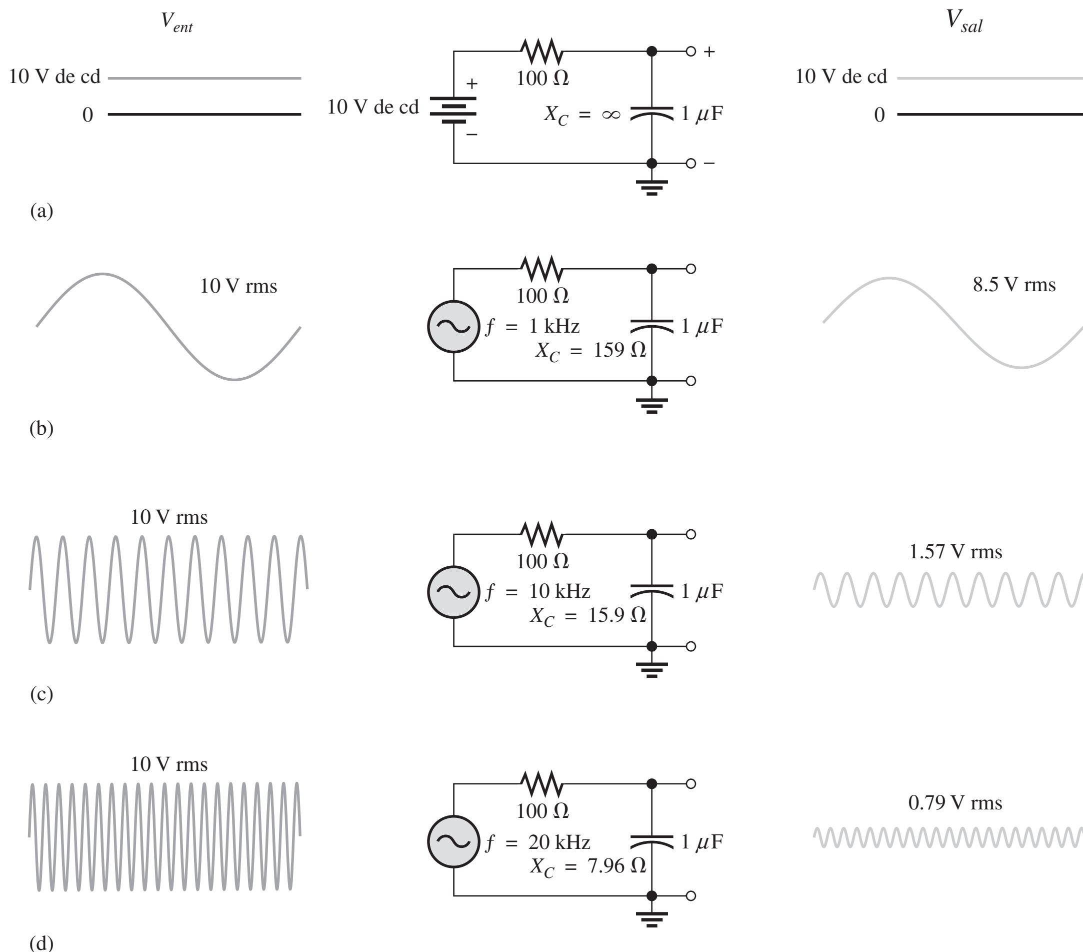
Los **filtros** son circuitos selectores de frecuencia que dejan pasar señales de cierta frecuencia desde la entrada hasta la salida en tanto que bloquean todas las demás señales. Es decir, todas las frecuencias excepto las seleccionadas son las que se filtran. Los filtros se estudian a fondo en el capítulo 18, pero se introducen aquí como un ejemplo de aplicación.

Los circuitos *RC* dispuestos en serie exhiben una característica selectora de frecuencia y, por ende, actúan como filtros básicos. Existen dos tipos. El primero que se examina, llamado **filtro pasabajas**, actúa tomando la salida entre las terminales del capacitor, exactamente como en un circuito de retraso. El segundo tipo, un **filtro pasaaltas**, se implementa al tomar la salida entre los extremos del resistor, como en un circuito de adelanto.

Filtro pasabajas Ya estudiamos qué sucede con la magnitud de la salida y el ángulo de fase en un circuito de retraso. En función de su acción filtrante, lo que interesa de manera primordial es la variación de la magnitud de la salida con la frecuencia.

La figura 15-64 muestra la acción filtrante de un circuito *RC* en serie que utiliza valores específicos a modo de ilustración. En la parte (a) de la figura, la entrada es frecuencia cero (cd). Como el capacitor bloquea la corriente directa constante, el voltaje de salida es igual al valor completo del voltaje de entrada porque no hay caída de voltaje entre los extremos de *R*. Entonces, el circuito deja pasar todo el voltaje de entrada hasta la salida (entran 10 V, salen 10 V).

En la figura 15-64(b), la frecuencia del voltaje de entrada se incrementó a 1 kHz, lo cual propicia que la reactancia capacitiva disminuya a 159 Ω. Con un voltaje de entrada de 10 V rms, el



▲ **FIGURA 15–64**

Acción de filtrado pasabajas (no se indican los desplazamientos de fase).

voltaje de salida es aproximadamente de 8.5 V rms, el cual puede ser calculado aplicando el método del divisor de voltaje o la ley de Ohm.

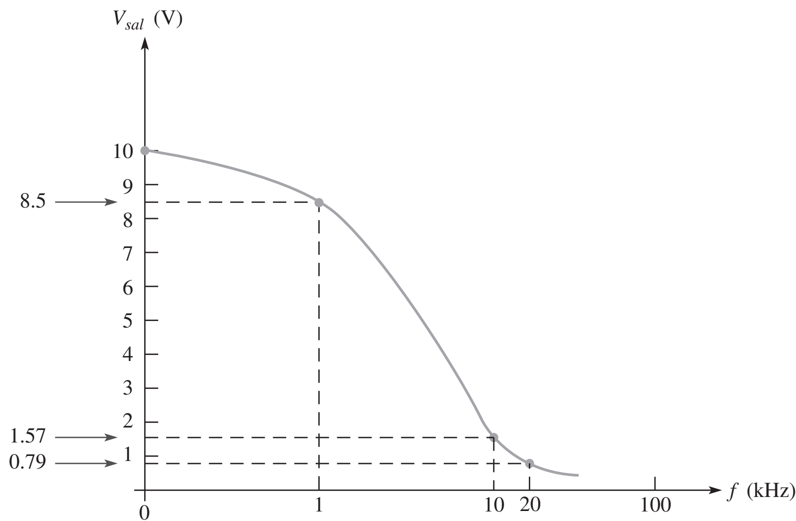
En la figura 15-64(c), la frecuencia de entrada se incrementó a 10 kHz, causando que la reactancia capacitiva disminuya aún más hasta 15.9 Ω. Con un voltaje de entrada constante de 10 V rms, el voltaje de salida es ahora de 1.57 V rms.

Conforme la frecuencia de entrada se incrementa aún más, el voltaje de salida sigue disminuyendo y se aproxima a cero a medida que la frecuencia llega a ser muy alta, según muestra la figura 15-64(d).

Una descripción de la acción del circuito es como sigue: conforme la frecuencia de la entrada se incrementa, la reactancia capacitiva disminuye. Puesto que la resistencia es constante y la reactancia capacitiva disminuye, el voltaje entre las terminales del capacitor (voltaje de salida) también disminuye de acuerdo con el principio del divisor de voltaje. Es posible incrementar la frecuencia de entrada hasta que alcance un valor al cual la reactancia sea tan pequeña comparada con la resistencia que el voltaje de salida pueda ser ignorado porque es muy pequeño en comparación con el voltaje de entrada. A este valor de frecuencia, esencialmente el circuito bloquea por completo la señal de entrada.

Así como indica la figura 15-64, el circuito dejar pasar cd (frecuencia de cero) por completo. Conforme se incrementa la frecuencia de la entrada, menos voltaje de entrada pasa por la salida; es decir, el voltaje de salida disminuye conforme aumenta la frecuencia. Es aparente que las frecuencias bajas pasan mucho mejor a través del circuito que las frecuencias altas. Por consiguiente, este circuito *RC* es una forma muy básica de filtro pasabajas.

La **respuesta de frecuencia** del circuito filtro pasabajas ilustrado en la figura 15-64 se muestra en la figura 15-65 con una gráfica de la magnitud del voltaje de salida frente a la frecuencia. Esta gráfica, llamada *curva de respuesta*, indica que la salida disminuye conforme se incrementa la frecuencia.



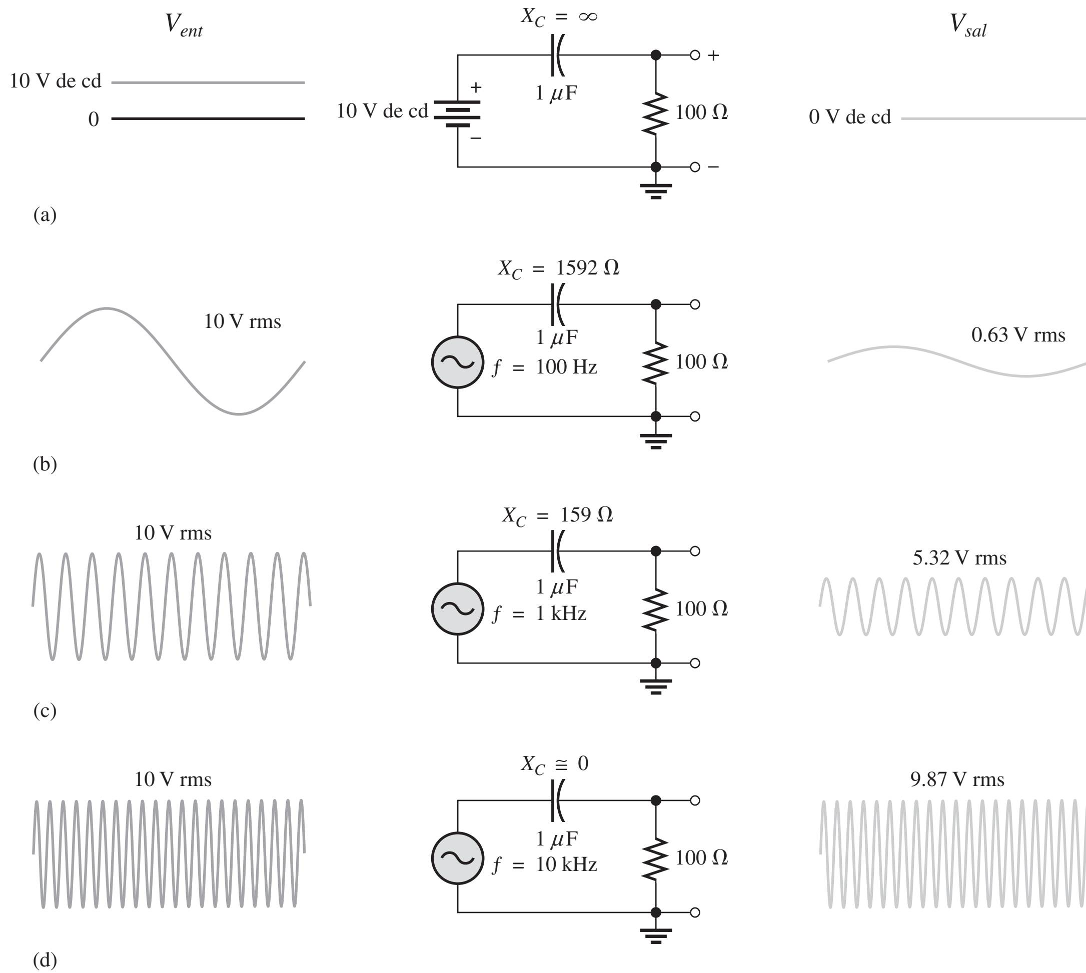
▲ **FIGURA 15–65**

Curva de respuesta a la frecuencia para el filtro pasabajas de la figura 15-64.

Filtro pasaaltas La figura 15-66 ilustra la acción de filtrado pasaaltas, donde la salida se toma entre los extremos del resistor, exactamente como en un circuito de adelanto. Cuando el voltaje de entrada es cd (frecuencia de cero) en la parte (a), la salida es de cero volts porque el capacitor bloquea la corriente directa; por consiguiente, no se desarrolla voltaje entre los extremos de *R*.

En la figura 15-66(b), la frecuencia de la señal de entrada se incrementó a 100 Hz con un valor rms de 10 V. El voltaje de salida es de 0.63 V rms. Por tanto, sólo un pequeño porcentaje del voltaje de entrada aparece en la salida a esta frecuencia.

En la figura 15-66(c), la frecuencia de entrada se incrementa aún más a 1 kHz, ello provoca que se desarrolle más voltaje entre los extremos del resistor a causa de la disminución adicional de la reactancia capacitiva. El voltaje de salida a esta frecuencia es de 5.32 V rms. Como puede



▲ FIGURA 15–66

Acción de filtrado pasaaltas (no se indican los desplazamientos de fase).

observarse, el voltaje de salida se incrementa conforme aumenta la frecuencia. Se alcanza un valor de frecuencia al cual la reactancia es insignificante comparada con la resistencia, y la mayor parte del voltaje de entrada aparece entre los extremos del resistor, como ilustra la figura 15-66(d).

Tal como se ilustra, este circuito tiende a impedir que las frecuencias bajas aparezcan a la salida, pero permite que las altas pasen desde la entrada hasta la salida. Entonces, este circuito es una forma básica de filtro pasaaltas.

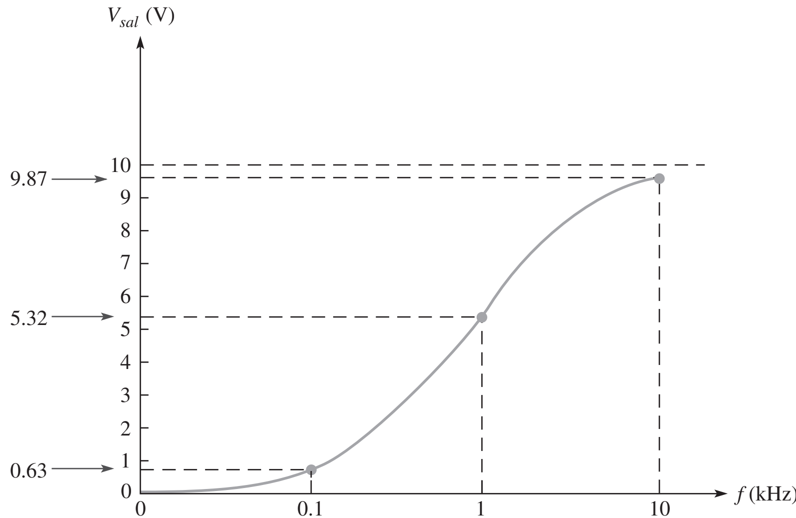
La respuesta de frecuencia del circuito pasaaltas mostrado en la figura 15-66 se ilustra en la figura 15-67 mediante una gráfica de la magnitud del voltaje de salida contra la frecuencia. Esta curva de respuesta permite observar que la salida se incrementa conforme aumenta la frecuencia y luego se nivela y tiende hacia el valor del voltaje de entrada.

La frecuencia de corte y el ancho de banda de un filtro La frecuencia a la cual la reactancia capacitiva es igual a la resistencia en un filtro *RC* pasabajas y pasaaltas se llama **frecuencia de corte**, y se designa mediante f_c. Esta condición se expresa como $1/(2\pi f_c C) = R$. Al resolver para f_c se obtiene la siguiente fórmula:

Ecuación 15–34

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

A f_c, el voltaje de salida del filtro es un 70.7% de su valor máximo. Es una práctica estándar considerar la frecuencia de corte como el límite del desempeño de un filtro en función de la ac-

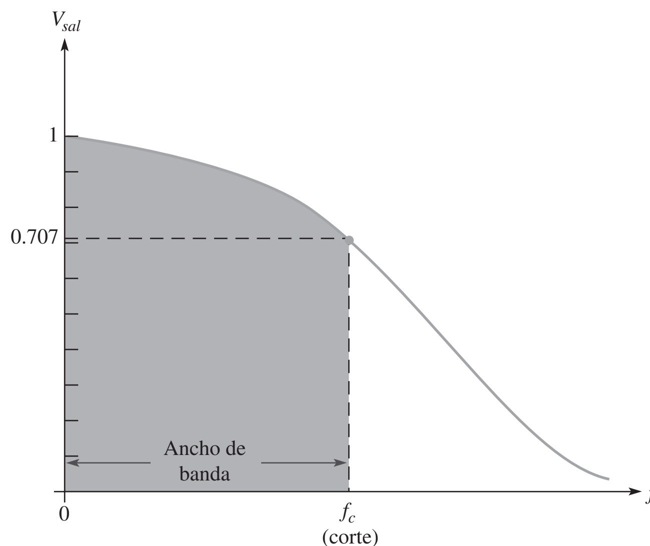


▲ **FIGURA 15–67**

Curva de respuesta a la frecuencia para el filtro pasaaltas de la figura 15-66.

ción de dejar pasar o rechazar frecuencias. Por ejemplo, en un filtro pasaaltas, se considera que el filtro deja para todas las frecuencias ubicadas por encima de f_c. Lo inverso es cierto para un filtro pasabajas.

El intervalo de frecuencias que se considera deja pasar un filtro es llamado **ancho de banda**. La figura 15-68 ilustra el ancho de banda y la frecuencia de corte para un filtro pasabajas.



▲ **FIGURA 15–68**

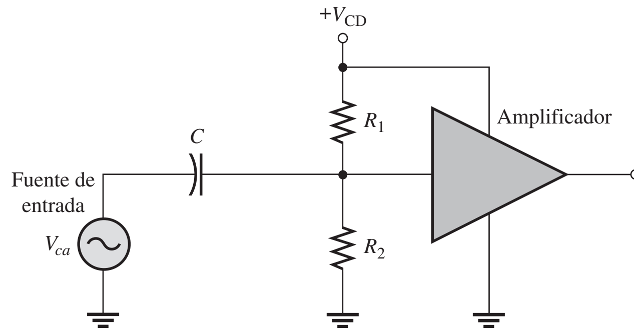
Curva de respuesta general normalizada de un filtro pasabajas que muestra la frecuencia de corte y el ancho de banda.

Acoplamiento de una señal de CA a un circuito de polarización de cd

La figura 15-69 muestra un circuito *RC* que se utiliza para crear un nivel de voltaje de cd con un voltaje de ca superpuesto. Este tipo de circuito se encuentra comúnmente en amplificadores donde se requiere que el voltaje de cd **polarice** el amplificador al punto de operación apropiado, y

▶ **FIGURA 15–69**

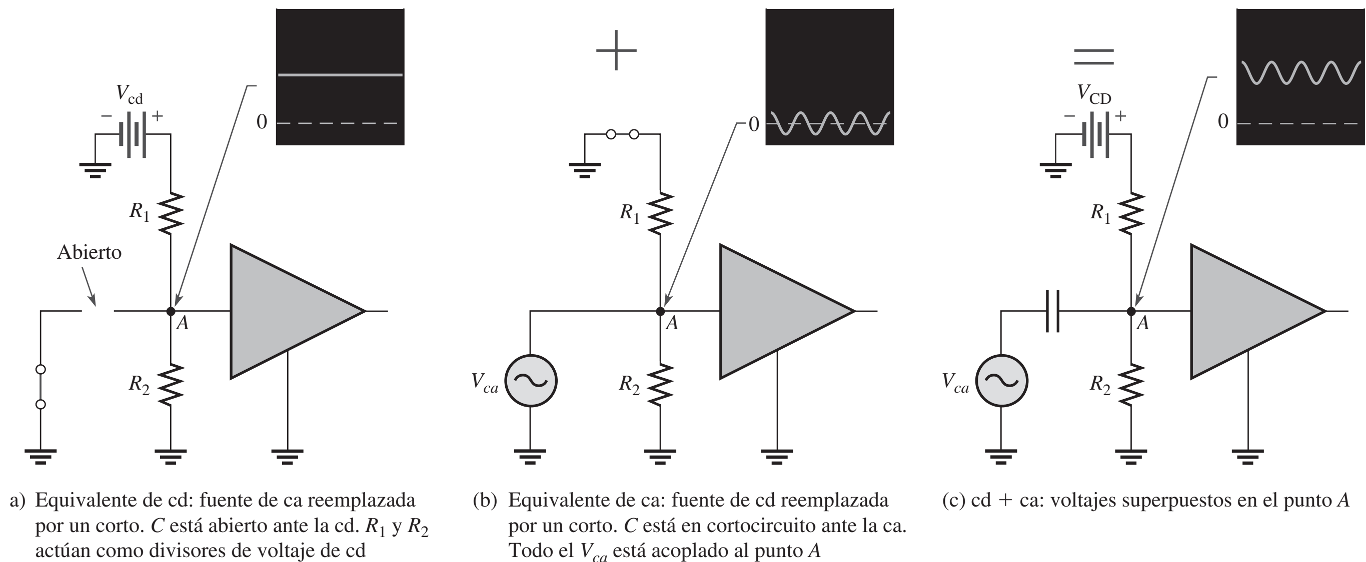
Circuito de polarización y acoplamiento de señal en un amplificador.



que la señal de voltaje a ser amplificada se acople mediante un capacitor y se superponga sobre el nivel de cd. El capacitor impide que la baja resistencia interna de la fuente de señal afecte el voltaje de polarización de cd.

En este tipo de aplicación, se elige un valor de capacitancia relativamente grande para las frecuencias que van a ser amplificadas, la reactancia es muy pequeña comparada con la resistencia de la red de polarización. Cuando la reactancia es muy pequeña (idealmente de cero), prácticamente no existe desplazamiento de fase o caída del voltaje de la señal entre los extremos del capacitor. Por consiguiente, todo el voltaje de la señal pasa desde la fuente hasta la entrada del amplificador.

La figura 15-70 ilustra la aplicación del principio de superposición al circuito de la figura 15-69. En la parte (a), la fuente de ca ha sido efectivamente retirada del circuito y reemplazada con un corto para representar su resistencia interna ideal (la resistencia interna de generadores reales es por lo general de 50 o 600 Ω). Como *C* está abierto a la cd, la acción de divisor de voltaje de R_1 y R_2 y el voltaje de fuente de cd determinan el voltaje en el punto *A*.



a) Equivalente de cd: fuente de ca reemplazada por un corto. *C* está abierto ante la cd. R_1 y R_2 actúan como divisores de voltaje de cd

(b) Equivalente de ca: fuente de cd reemplazada por un corto. *C* está en cortocircuito ante la ca. Todo el V_{ca} está acoplado al punto *A*

(c) cd + ca: voltajes superpuestos en el punto *A*

▲ **FIGURA 15–70**

Superposición de voltajes de cd y ca en un circuito *RC* de acoplamiento y polarización.

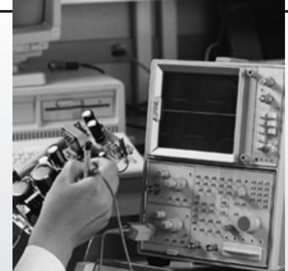
En la figura 15-70(b), la fuente de cd ha sido efectivamente retirada del circuito y reemplazada con un corto para representar su resistencia interna ideal. Ya que *C* aparece como un corto a la frecuencia de la ca, el voltaje de la señal se acopla directamente al punto *A* y aparece entre la combinación en paralelo de R_1 y R_2.

La figura 15-70(c) ilustra que el efecto combinado de la superposición de los voltajes de cd y ca produce un voltaje de señal "montado" sobre el nivel de cd.

REPASO DE LA SECCIÓN 15-9

1. ¿Cuánto desplazamiento de fase produce el circuito *RC* en un oscilador de desplazamiento de fase?
2. Cuando se utiliza un circuito *RC* como filtro pasabajas, ¿a través de qué componente se toma la salida?

15–10 LOCALIZACIÓN DE FALLAS

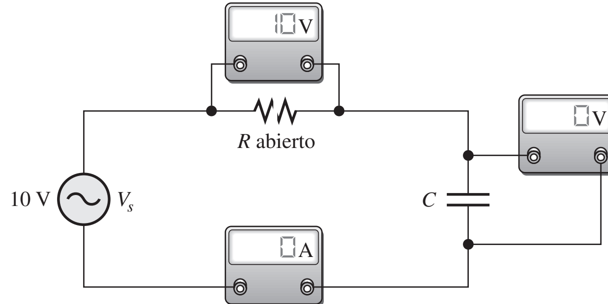


Las fallas o la degradación de algunos componentes típicos afectan la respuesta a la frecuencia en circuitos *RC* básicos.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Localizar fallas en circuitos *RC***
  - Localizar un resistor o un capacitor abiertos
  - Localizar un capacitor en cortocircuito
  - Localizar un capacitor con fugas

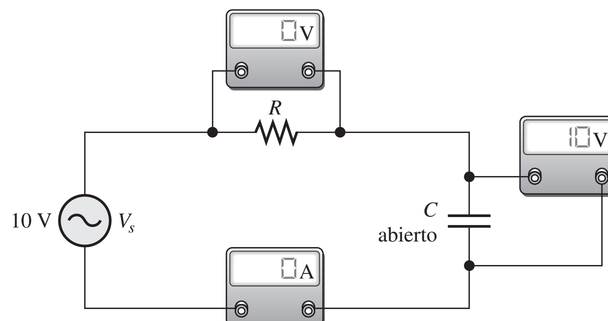
Efecto de un resistor abierto Es fácil advertir cómo afecta un resistor abierto la operación de un circuito *RC* básico dispuesto en serie, tal como se ilustra en la figura 15-71. Desde luego, no hay trayectoria para la corriente, de modo que el voltaje en el capacitor permanece en cero; por tanto, el voltaje total, V_s, aparece entre los extremos del resistor abierto.



▲ **FIGURA 15–71**

Efecto de un resistor abierto.

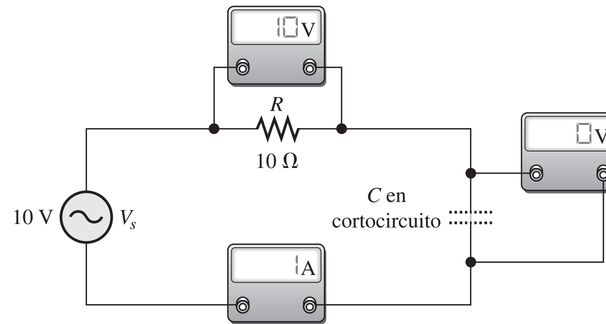
Efecto de un capacitor abierto Cuando el capacitor se abre, no hay flujo de corriente; por tanto, el voltaje en el resistor permanece en cero. El voltaje total de fuente aparece entre los extremos del capacitor abierto, como se muestra en la figura 15-72.



◀ **FIGURA 15–72**

Efecto de un capacitor abierto.

Efecto de un capacitor en cortocircuito Los capacitores rara vez entran en cortocircuito, pero cuando lo hacen, el voltaje en ellos es de cero, la corriente es igual a V_s/R, y el voltaje total aparece entre los extremos del resistor, como se ve en la figura 15-73.



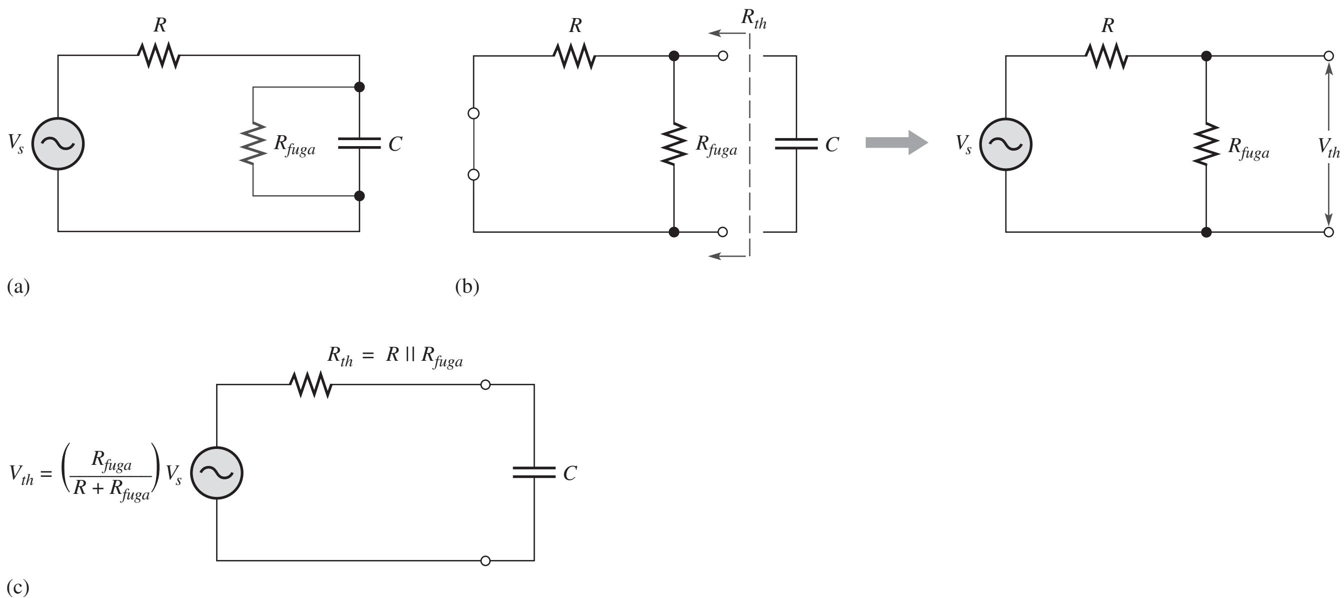
▲ **FIGURA 15–73**

Efecto de un capacitor en cortocircuito.

Efecto de un capacitor con fugas Cuando un gran capacitor electrolítico exhibe una alta corriente de fuga, la resistencia de fuga aparece efectivamente en paralelo con el capacitor, como se muestra en la figura 15-74(a). Cuando la resistencia de fuga es de valor comparable a la resistencia del circuito, R, la respuesta del circuito se ve drásticamente afectada. El circuito, visto desde el capacitor hacia la fuente, puede ser reducido a su equivalente de Thevenin, según ilustra la figura 15-74(b). La resistencia Thevenin equivalente es R en paralelo con R_{fuga} (la fuente aparece como un corto), y la acción de divisor de voltaje de R y R_{fuga} determina el voltaje Thevenin equivalente.

$$R_{th} = R \| R_{fuga} = \frac{RR_{fuga}}{R + R_{fuga}}$$

$$V_{th} = \left(\frac{R_{fuga}}{R + R_{fuga}}\right)V_s$$

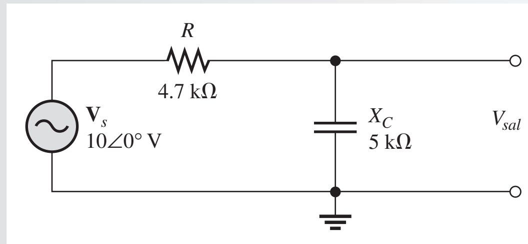


▲ **FIGURA 15–74**

Efecto de un capacitor con fugas.

Como puede advertirse, el voltaje entre las terminales del capacitor se reduce puesto que $V_{th} < V_s$. Asimismo, la constante de tiempo del circuito se reduce y la corriente aumenta. El circuito Thevenin equivalente se muestra en la figura 15-74(c).

EJEMPLO 15–26 Suponga que el capacitor de la figura 15-75 se degrada hasta el punto en que su resistencia de fuga es de 10 kΩ. Determine el voltaje de salida bajo la condición de degradación.



▲ **FIGURA 15–75**

Solución La resistencia efectiva del circuito es

$$R_{th} = \frac{RR_{fuga}}{R + R_{fuga}} = \frac{(4.7\,\text{k}\Omega)(10\,\text{k}\Omega)}{14.7\,\text{k}\Omega} = 3.20\,\text{k}\Omega$$

Para determinar el voltaje de salida, encuentre el voltaje Thevenin equivalente.

$$V_{th} = \left(\frac{R_{fuga}}{R + R_{fuga}}\right)V_s = \left(\frac{10\,\text{k}\Omega}{14.7\,\text{k}\Omega}\right)10\text{ V} = 6.80\text{ V}$$

Entonces,

$$V_{sal} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R_{th}^2 + X_C^2}}\right)V_{th} = \left(\frac{5\,\text{k}\Omega}{\sqrt{(3.2\,\text{k}\Omega)^2 + (5\,\text{k}\Omega)^2}}\right)6.80\text{ V} = \mathbf{5.73\text{ V}}$$

Problema relacionado ¿Cuál sería el voltaje de salida si el capacitor no tuviera fugas?

Otras consideraciones sobre localización de fallas

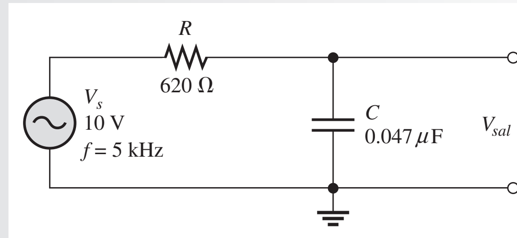
Hasta ahora, usted ha aprendido acerca de fallas de componentes específicos y mediciones de voltaje asociadas. Muchas veces, sin embargo, la falla de un circuito no es resultado de un componente defectuoso. Un hilo eléctrico suelto, un mal contacto, o una junta soldada defectuosa pueden provocar un circuito abierto. Un corto puede ser causado por la sujeción de un conductor eléctrico o por una rebaba de soldadura. Cosas tan simples como no enchufar una fuente de potencia o un generador de funciones suceden más a menudo de lo que se piensa. Los valores equivocados en un circuito (tal como un valor de resistor incorrecto), el generador de funciones ajustado a la frecuencia errónea, o la salida equivocada conectada al circuito pueden provocar una operación inadecuada.

Cuando se tengan problemas con un circuito, siempre se deberá verificar para asegurarse de que los instrumentos están conectados apropiadamente a los circuitos y a una toma de corriente de energía eléctrica. Asimismo, hay que revisar en busca de cosas obvias, tal como un contacto roto o suelto, un conector que no está completamente enchufado, o un pedazo de conductor o un puente de soldadura que podrían estar poniendo en cortocircuito a algún componente.

El punto es que se deberán considerar todas las posibilidades, no solo componentes defectuosos, cuando un circuito no está funcionando en el modo apropiado. El ejemplo siguiente ilustra este enfoque aplicado a un circuito simple utilizando el método APM (análisis, planificación y medición).

EJEMPLO 15–27 El circuito representado por el diagrama de la figura 15-76 no tiene voltaje de salida, el cual es el voltaje presente entre las terminales del capacitor. Se espera ver aproximadamente 7.4 V a la salida. El circuito está construido físicamente en una tarjeta prototipo. Aplique sus habilidades de localización de fallas para encontrar el problema.

▶ **FIGURA 15–76**



Solución Aplique el método APM a este problema de localización de fallas.

Análisis: Primero piense en las posibles causas que hacen que el circuito no tenga voltaje de salida.

1. No hay voltaje de fuente o la frecuencia es tan alta que la reactancia capacitiva es casi de cero.
2. Hay un corto entre las terminales de salida. O el capacitor podría estar internamente en cortocircuito, o podría haber un corto físico en el circuito.
3. Hay una abertura entre la fuente y la salida. Esto interrumpiría la corriente, y por tanto haría que el voltaje de salida fuera de cero. El resistor podría estar abierto, o la trayectoria conductiva podría estar abierta debido a un cable de conexión abierto o suelto o a un contacto defectuoso en la tarjeta prototipo.
4. Hay un valor de componente incorrecto. El resistor podría ser tan grande que la corriente y, por tanto, el voltaje de salida resulten insignificantes. El capacitor podría ser tan grande que su reactancia a la frecuencia de entrada sea casi de cero.

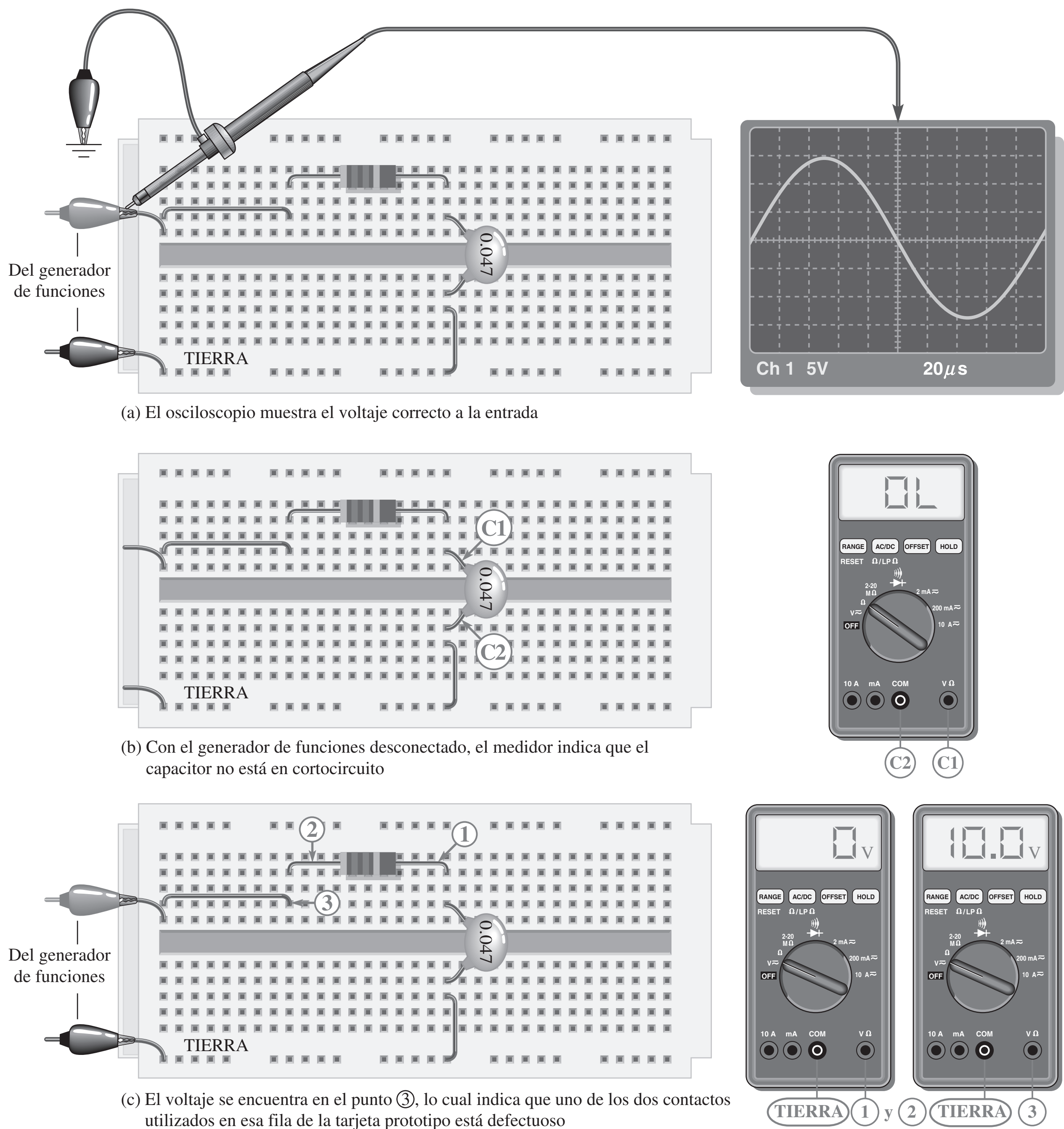
Planificación: Usted decide realizar algunas verificaciones visuales en busca de problemas tales como el cordón de energía del generador de funciones no enchufado o la frecuencia ajustada a un valor incorrecto. Asimismo, conductores rotos, conductores en cortocircuito, un código de colores de resistor o una designación de capacitor incorrectos a menudo pueden ser localizados visualmente. Si no descubre nada después de una verificación visual, entonces deberá medir el voltaje para rastrear la causa del problema. Así que decide utilizar un osciloscopio digital y un multímetro digital (DMM) para realizar las mediciones.

Medición: Suponga que descubre que el generador de funciones está enchufado y que el ajuste de frecuencia parece ser el correcto. Además, no encuentra aberturas o cortos visibles durante su verificación visual, y los valores de los componentes son correctos.

El primer paso en el proceso de medición es verificar con el osciloscopio el voltaje producido por la fuente. Suponga que se observa una onda seno de 10 V rms con frecuencia de 5 kHz a la entrada del circuito, como se muestra en la figura 15-77(a). El voltaje correcto está presente, *así que la primera posible causa ha sido eliminada*.

A continuación, revise en busca de un capacitor en cortocircuito desconectando la fuente y colocando un multímetro digital (puesto en la función ohmmetro) entre las terminales del capacitor. Si el capacitor está en buenas condiciones, una abertura será indicada mediante una OL (sobrecarga) en la pantalla del medidor luego de un corto tiempo de carga. Suponga que las verificaciones señalan que el capacitor está bien, como ilustra la figura 15-77(b). *La segunda posible causa ha sido eliminada*.

Como el voltaje se encuentra “perdido” en alguna parte entre la entrada y la salida, ahora debe buscarlo. Reconecte la fuente y mida el voltaje en el resistor con el DMM (puesto en la función “voltmeter”) de una de las terminales del resistor a la otra. El voltaje en el resistor es de cero. Esto significa que no hay corriente, lo cual indica la presencia de una abertura en alguna parte del circuito.



▲ **FIGURA 15–77**

Ahora, comience a rastrear el circuito hacia atrás en dirección a la fuente en busca de voltaje (también podría iniciar desde la fuente y proceder hacia adelante). Puede utilizar el osciloscopio o el DMM, pero se decide por el multímetro con un conductor conectado a tierra y el otro para examinar el circuito. Como indica la figura 15-77(c), el voltaje en la terminal derecha del resistor, punto ①, es de cero. Dado que ya se midió un voltaje de cero en el resistor, el voltaje en la terminal izquierda del resistor, punto ②, debe ser también de cero como señala el

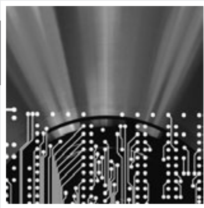
medidor. A continuación, llevando la punta de prueba del medidor hasta el punto ③, se lee 10 V. ¡Acaba de encontrar el voltaje! Como hay cero volts en la terminal izquierda del resistor y 10 V en el punto ③, uno de los dos contactos localizados en el orificio de la tarjeta prototipo donde se insertan los conductores está defectuoso. Pudiera ser que los pequeños contactos hayan sido empujados demasiado hacia dentro y se doblaron o rompieron, de modo que la terminal del circuito no hace contacto.

Lleva uno u otro conductor, o ambos, del resistor y el hilo eléctrico hacia otro orificio ubicado en la misma fila. Suponga que cuando el conductor del resistor se mueve al orificio localizado exactamente encima del otro, usted tiene voltaje a la salida del circuito (entre las terminales del capacitor).

Problema relacionado Suponga que midió 10 V entre los extremos del resistor antes de que el capacitor fuera verificado. ¿Qué indicaría esto?

REPASO DE LA SECCIÓN 15-10

1. **Describa el efecto que produce un capacitor con fugas en la respuesta de un circuito *RC*.**
2. **En un circuito *RC* en serie, si todo el voltaje aplicado aparece entre las terminales del capacitor, ¿cuál es el problema?**
3. **¿Qué fallas pueden provocar 0 V a través de un capacitor en un circuito *RC* en serie si la fuente está funcionando apropiadamente?**



Una aplicación de circuito

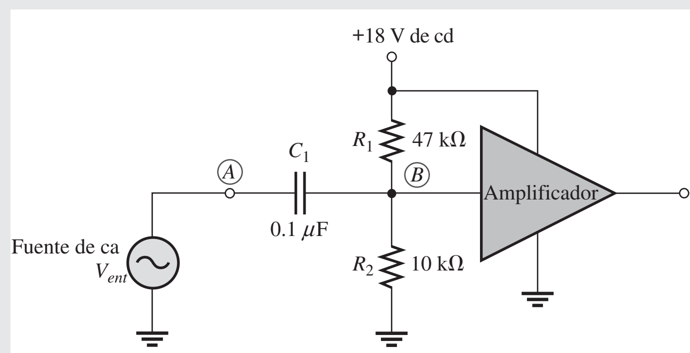
En el capítulo 12, usted estudió la entrada acoplada capacitivamente a un amplificador con polarización mediante un divisor de voltaje. En esta aplicación de circuito, revisará el voltaje de salida y el retraso de fase de un circuito con una entrada similar del amplificador para determinar cómo cambian con la frecuencia. Si la caída de voltaje en el capacitor es demasiada, el desempeño total del amplificador se ve adversamente afectado.

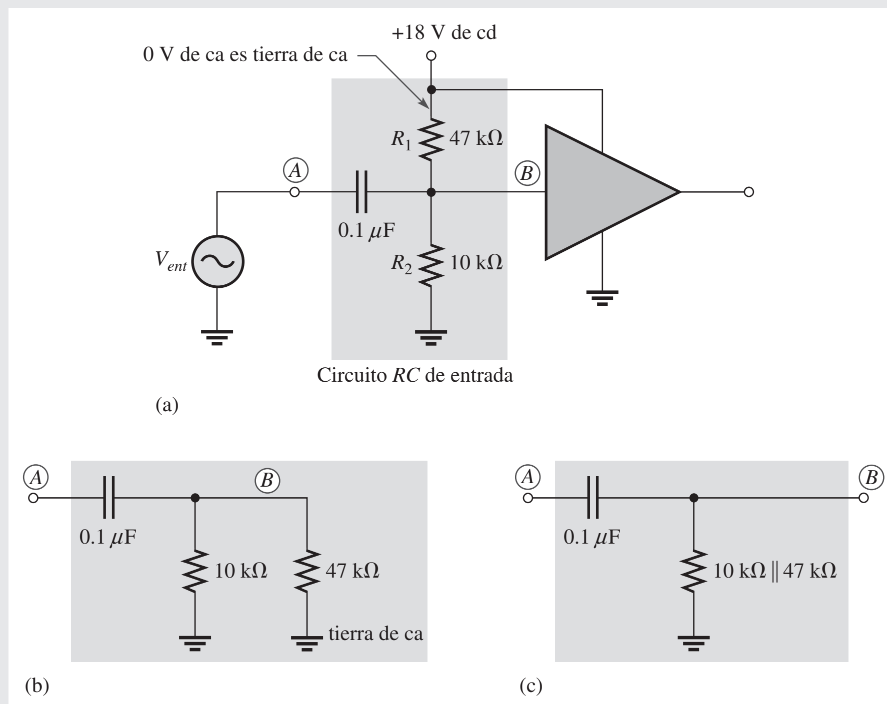
Como aprendió en el capítulo 12, el capacitor de acoplamiento (C_1) mostrado en la figura 15-78 deja pasar el voltaje de la señal de entrada hasta la entrada del amplificador (punto *A* a punto *B*) sin afectar el nivel de cd en el punto *B* producido por el divisor de voltaje resistivo (R_1 y R_2). Si la frecuencia de entrada es lo suficientemente alta, de modo que la reactancia del capacitor de acoplamiento es insignificantemente pequeña, en esencia no hay caída del voltaje de señal de ca en el capacitor. Conforme se reduce la frecuencia de la señal, aumenta la reactancia capacitiva y más del voltaje de señal decae entre las terminales del capacitor. Esto reduce la ganancia de voltaje total del amplificador, y por tanto degrada su desempeño.

Los valores del capacitor y de los resistores de polarización de cd (suponiendo que el amplificador no tiene efecto de carga) determinan la cantidad de voltaje de señal acoplado desde la fuente de entrada (punto *A*) hasta la entrada del amplificador (punto *B*) en la figura 15-78. Estos componentes forman en realidad un fil-

▶ **FIGURA 15–78**

Capacitor acoplado capacitivamente.





▲ **FIGURA 15–79**

El circuito *RC* de entrada actúa efectivamente como un filtro *RC* pasaaltas

tro *RC* pasaaltas, como se muestra en la figura 15-79. Los resistores de polarización del divisor de voltaje están efectivamente en paralelo entre sí, por lo que se refiere a la fuente de ca, debido a que la fuente de potencia tiene resistencia interna de cero. El extremo inferior de R_2 se va a tierra y el extremo superior de R_1 se va al voltaje de suministro de cd, como indica la figura 15-79(a). Dado que no hay voltaje de ca en la terminal de cd a +18 V, el extremo superior de R_1 está a 0 V de ca, el cual se conoce como *tierra de ca*. El desarrollo del circuito hacia un filtro *RC* pasaaltas efectivo se muestra en las partes (b) y (c).

El circuito de entrada del amplificador

- Determine el valor de la resistencia equivalente del circuito de entrada. Suponga que el amplificador (mostrado en la figura 15-80 dentro de las líneas punteadas blancas) no tiene efecto de carga en el circuito de entrada.

La respuesta a la frecuencia f_1

Consulte la figura 15-80. El voltaje de la señal de entrada se aplica a la tarjeta de circuito amplificador y aparece en pantalla en el canal 1 del osciloscopio, y el canal 2 se conecta a un punto de la tarjeta de circuito.

- Determine a qué punto del circuito se conecta la punta de prueba del canal 2, y encuentre la frecuencia y el voltaje que deberán aparecer en pantalla.

La respuesta a la frecuencia f_2

Consulte la figura 15-81 y la tarjeta de circuito mostrada en la figura 15-80. El voltaje de la señal de entrada que muestra la pantalla en el canal 1 del osciloscopio se aplica a la tarjeta de circuito del amplificador.

- Determine la frecuencia y el voltaje que deberán aparecer en pantalla en el canal 2.
- Establezca la diferencia entre las formas de onda del canal 2 determinadas para f_1 y f_2. Explique la razón de la diferencia.

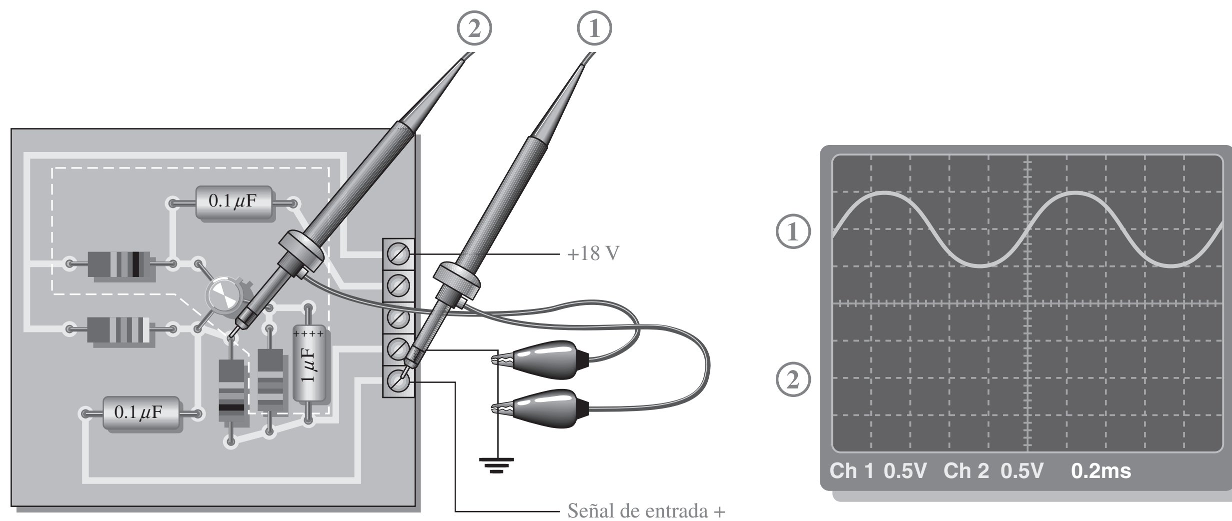
La respuesta a la frecuencia f_3

Consulte la figura 15-82 y la tarjeta de circuito mostrada en la figura 15-80. El voltaje de la señal de entrada que aparece en pantalla en el canal 1 del osciloscopio se aplica a la tarjeta de circuito del amplificador.

- Determine la frecuencia y el voltaje que deberán aparecer en el canal 2.
- Establezca la diferencia entre las formas de onda que aparecen en el canal 2 determinadas para f_2 y f_3. Explique la razón de la diferencia.

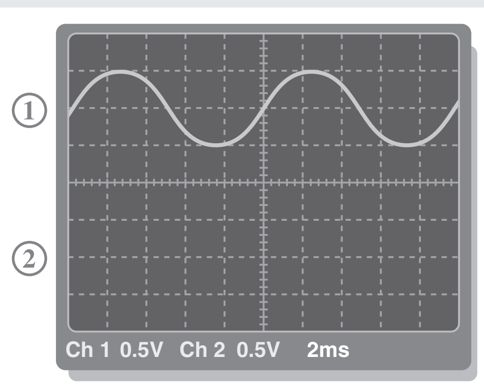
Curva de respuesta para el circuito de entrada al amplificador

- Determine la frecuencia a la cual el voltaje de la señal en el punto *B* mostrado en la figura 15-78 está al 70.7% de su valor máximo.
- Trace la curva de respuesta con este valor de voltaje y los valores a las frecuencias f_1, f_2 y f_3.
- ¿De qué manera muestra esta curva que el circuito de entrada actúa como un filtro pasaaltas?



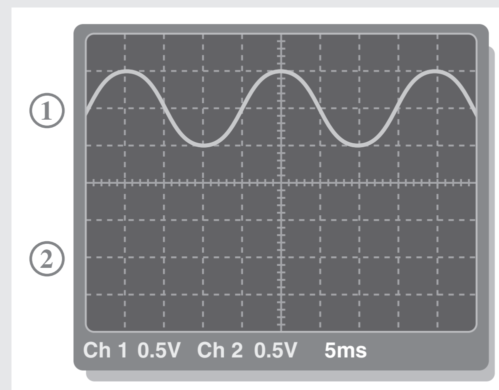
▲ **FIGURA 15–80**

Medición de la respuesta del circuito de entrada a la frecuencia f_1. Los números dentro de círculos relacionan las entradas al osciloscopio con los sensores. Se muestra la forma de onda en el canal 1.



▲ **FIGURA 15–81**

Medición de la respuesta del circuito de entrada a la frecuencia f_2. Se muestra la forma de onda en el canal 1.



▲ **FIGURA 15–82**

Medición de la respuesta del circuito de entrada a la frecuencia f_3. Se muestra la forma de onda en el canal 1.

◆ ¿Qué puede hacerle usted al circuito para bajar la frecuencia a la cual el voltaje es de un 70.7% de su valor máximo sin que se afecte el voltaje de polarización de cd?

Repaso

1. Explique el efecto que tiene en la respuesta del circuito de entrada del amplificador el hecho de reducir el valor del capacitor de acoplamiento.
2. ¿Cuál es el voltaje en el punto *B* de la figura 15-78 si el capacitor de acoplamiento se abre cuando la señal de entrada de ca es de 10 mV rms?
3. ¿Cuál es el voltaje en el punto *B* de la figura 15-78 si el resistor R_1 se abre cuando la señal de entrada de ca es de 10 mV rms?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de temas especiales continúa en el capítulo 16, parte 4, en la página 702.

RESUMEN

- Un número complejo representa una cantidad fasorial.
- La forma rectangular de un número complejo consta de una parte real y una parte *j* de la forma $A + jB$.
- La forma polar de un número complejo consta de una magnitud y un ángulo de la forma $C \angle \pm\theta$.
- Los números complejos pueden ser sumados, restados, multiplicados y divididos.
- Cuando se aplica un voltaje sinusoidal a un circuito *RC*, la corriente y todas las caídas de voltaje también son ondas seno.
- La corriente total que circula en un circuito *RC* en serie o en paralelo siempre se adelanta al voltaje de fuente.
- El voltaje en el resistor siempre está en fase con la corriente.
- El voltaje en el capacitor siempre se retrasa en 90° con respecto a la corriente.
- En un circuito de retraso, el voltaje de salida se retrasa con respecto al voltaje de entrada en fase.
- En un circuito de adelanto, el voltaje de salida se adelanta al voltaje de entrada.
- En un circuito *RC*, tanto la resistencia como la reactancia capacitiva combinadas determinan la impedancia.
- La impedancia se expresa en unidades de ohms.
- El ángulo de fase del circuito es el ángulo entre la corriente total y el voltaje aplicado (fuente).
- La impedancia de un circuito *RC* en serie varía inversamente con la frecuencia.
- El ángulo de fase (θ) de un circuito *RC* en serie varía inversamente con la frecuencia.
- Para cada circuito *RC* en paralelo, existe un circuito en serie equivalente para cualquier frecuencia dada.
- Para cada circuito *RC* en serie, existe un circuito equivalente en paralelo para cualquier frecuencia dada.
- La impedancia de un circuito se determina midiendo el voltaje aplicado y la corriente total y aplicando luego la ley de Ohm.
- En un circuito *RC*, una parte de la potencia es resistiva y otra es reactiva.
- La combinación fasorial de la potencia resistiva (potencia real) y la potencia reactiva se llama *potencia aparente*.
- La potencia aparente se expresa en volt-amperes (VA).
- El factor de potencia (*FP*) indica cuánta de la potencia aparente es potencia real.
- Un factor de potencia de 1 indica un circuito puramente resistivo, y un factor de potencia de 0 indica un circuito puramente reactivo.
- Un filtro deja pasar ciertas frecuencias y rechaza a otras.
- Un oscilador de desplazamiento de fase utiliza una red *RC* para producir un desplazamiento de fase de 180°.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas incluidos en el capítulo se definen en el glosario que aparece al final del libro.

Admitancia (*Y*) Medida de la capacidad de un circuito reactivo para permitir corriente; es el recíproco de la impedancia. La unidad es el siemens (S).

Ancho de banda Intervalo de las frecuencias que deja pasar un filtro.

Factor de potencia La relación entre volt-amperes y la potencia real o watts. Los volt-amperes multiplicados por el factor de potencia dan la potencia real.

Filtro Un tipo de circuito que deja pasar ciertas frecuencias y rechaza todas las demás.

Forma polar Forma de un número complejo compuesta por magnitud y ángulo.

Forma rectangular Forma de un número complejo compuesta por una parte real y una parte imaginaria.

Frecuencia de corte La frecuencia a la cual el voltaje de salida de un filtro es del 70.7% del máximo voltaje de salida.

Impedancia Oposición total a la corriente sinusoidal expresada en ohms.

Número imaginario Es un número que existe sobre el eje vertical del plano complejo.

Número real Número que existe sobre el eje horizontal del plano complejo.

Plano complejo Área compuesta por cuatro cuadrantes en los cuales se puede representar una cantidad que contenga tanto magnitud como dirección.

Potencia aparente (P_a) Es la combinación fasorial de potencia resistiva (potencia real) y potencia reactiva. La unidad es el volt-ampere (VA).

Respuesta a la frecuencia En circuitos eléctricos, es la variación del voltaje de salida (o de corriente) dentro de un intervalo de frecuencias especificado.

Susceptancia capacitiva (B_C) La capacidad de un capacitor de permitir el paso de corriente; es el recíproco de la reactancia capacitiva. La unidad es el siemens (S).

FÓRMULAS

Números complejos

15–1 $C = \sqrt{A^2 + B^2}$

15–2 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pm B}{A}\right)$

15–3 $\pm A \pm jB = C\angle\pm\theta$

15–4 $A = C\cos\theta$

15–5 $B = C\,\text{sen}\,\theta$

15–6 $C\angle\theta = A + jB$

Circuitos *RC* en serie

15–7 $\mathbf{Z} = R - jX_C$

15–8 $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_C^2}\angle - \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$

15–9 $\mathbf{V} = \mathbf{IZ}$

15–10 $\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}}$

15–11 $\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$

15–12 $\mathbf{V}_s = V_R - jV_C$

15–13 $\mathbf{V}_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}\angle - \tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$

Circuito de retraso

15–14 $\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$

15–15 $V_{sal} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent}$

Circuito de adelanto

15–16 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$

15–17 $V_{sal} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent}$

Circuitos *RC* en paralelo

15–18 $\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)\angle -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$

15–19 $\mathbf{Y} = G + jB_C$

15–20 $\mathbf{V} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{Y}}$

15–21 $\mathbf{I} = \mathbf{VY}$

15–22 $\mathbf{Y} = \dfrac{\mathbf{I}}{\mathbf{V}}$

15–23 $\mathbf{I}_{tot} = I_R + jI_C$

15–24 $\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}\angle\tan^{-1}\left(\dfrac{I_C}{I_R}\right)$

15–25 $R_{eq} = Z\cos\theta$

15–26 $X_{C(eq)} = Z\,\text{sen}\,\theta$

15–27 $\theta = \left(\dfrac{\Delta t}{T}\right)360°$

Potencia en circuitos *RC*

15–28 $P_{real} = I^2R$

15–29 $P_r = I^2X_C$

15–30 $P_a = I^2Z$

15–31 $P_{real} = VI\cos\theta$

15–32 $FP = \cos\theta$

Aplicaciones

15–33 $f_r = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$

15–34 $f_c = \dfrac{1}{2\pi RC}$

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Un ángulo positivo de 20° equivale a un ángulo negativo de
(a) −160° **(b)** −340° **(c)** −70° **(d)** −20°

2. En el plano complejo, el número 3 + *j*4 se localiza en el
(a) primer cuadrante **(b)** segundo cuadrante **(c)** tercer cuadrante **(d)** cuarto cuadrante

3. En el plano complejo, 12 − *j*6 se localiza en el
(a) primer cuadrante **(b)** segundo cuadrante **(c)** tercer cuadrante **(d)** cuarto cuadrante

4. El número complejo 5 + *j*5 equivale a
(a) $5\angle 45°$ **(b)** $25\angle 0°$ **(c)** $7.07\angle 45°$ **(d)** $7.07\angle 135°$

5. El número complejo $35\angle 60°$ equivale a
(a) 35 + *j*35 **(b)** 35 + *j*60 **(c)** 17.5 + *j*30.3 **(d)** 30.3 + *j*17.5

6. (4 + *j*7) + (−2 + *j*9) es igual a
(a) 2 + *j*16 **(b)** 11 + *j*11 **(c)** −2 + *j*16 **(d)** 2 − *j*2

7. (16 − *j*8) − (12 + *j*5) es igual a
(a) 28 − *j*13 **(b)** 4 − *j*13 **(c)** 4 − *j*3 **(d)** −4 + *j*13

8. $(5\angle 45°)(2\angle 20°)$ es igual a
(a) $7\angle 65°$ **(b)** $10\angle 25°$ **(c)** $10\angle 65°$ **(d)** $7\angle 25°$

9. $(50\angle 10°)/(25\angle 30°)$ es igual a
(a) $25\angle 40°$ **(b)** $2\angle 40°$ **(c)** $25\angle -20°$ **(d)** $2\angle -20°$

10. En un circuito *RC* en serie, el voltaje entre los extremos de la resistencia está
(a) en fase con el voltaje de fuente **(b)** retrasado en 90° con respecto al voltaje de fuente
(c) en fase con la corriente **(d)** retrasado en 90° con respecto a la corriente

11. En un circuito *RC* en serie, el voltaje a través del capacitor está
(a) en fase con el voltaje de fuente **(b)** retrasado en 90° con respecto al voltaje en el resistor
(c) en fase con la corriente **(d)** retrasado en 90° con respecto al voltaje de fuente

12. Cuando se incrementa la frecuencia del voltaje aplicado a un circuito *RC* en serie, la impedancia
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia **(d)** se duplica

13. Cuando disminuye la frecuencia del voltaje aplicado a un circuito *RC* en serie, el ángulo de fase
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia **(d)** se vuelve errático

14. En un circuito *RC* en serie, cuando la frecuencia y la resistencia se duplican, la impedancia
(a) también se duplica **(b)** se reduce a la mitad
(c) se cuadruplica **(d)** no se puede determinar sin valores

15. En un circuito *RC* en serie, se miden 10 V rms a través del resistor y también se miden 10 V rms a través del capacitor. El voltaje rms de la fuente es de
(a) 20 V **(b)** 14.14 V **(c)** 28.28 V **(d)** 10 V

16. Se miden los voltajes de la pregunta 15 a cierta frecuencia. Para hacer que el voltaje a través del resistor sea mayor que el voltaje a través del capacitor, la frecuencia
(a) debe incrementarse **(b)** debe reducirse
(c) debe mantenerse constante **(d)** no tiene ningún efecto

17. Cuando $R = X_C$, el ángulo de fase es de
(a) 0° **(b)** +90° **(c)** −90° **(d)** 45°

18. Para reducir el ángulo de fase a menos de 45°, debe existir la siguiente condición:
(a) $R = X_C$ **(b)** $R < X_C$ **(c)** $R > X_C$ **(d)** $R = 10X_C$

19. Cuando se incrementa la frecuencia del voltaje de fuente, la impedancia de un circuito *RC* en paralelo
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

20. En un circuito *RC* en paralelo, a través de la rama resistiva circula 1 A rms y 1 A rms pasa por la rama capacitiva. La corriente rms total es
(a) 1 A **(b)** 2 A **(c)** 2.28 A **(d)** 1.414 A

21. Un factor de potencia de 1 indica que el ángulo de fase del circuito es de
(a) 90° **(b)** 45° **(c)** 180° **(d)** 0°

22. Para cierta carga, la potencia real es de 100 W y la potencia reactiva de 100 VAR. La potencia aparente es de
(a) 200 VA **(b)** 100 VA **(c)** 141.4 VA **(d)** 141.4 W

23. Las fuentes de energía normalmente se valúan en
(a) watts **(b)** volt-amperes **(c)** volt-amperes reactivos **(d)** ninguna de estas medidas

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 15-86.

1. Si *C* se abre, el voltaje a través de él
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

2. Si *R* se abre, el voltaje a través de *C*
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

3. Si se incrementa la frecuencia, el voltaje a través de *R*
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 15-87.

4. Si R_1 se abre, el voltaje a través de R_2
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

5. Si C_2 se incrementa a 0.47 μF, el voltaje a través de C_2
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia

Consulte la figura 15-93.

6. Si R se abre, el voltaje a través del capacitor
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
7. Si el voltaje de la fuente se incrementa, X_C
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia

Consulte la figura 15-98.

8. Si R_2 se abre, el voltaje del extremo superior de R_2 a tierra
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
9. Si C_2 se pone en cortocircuito, el voltaje a través de C_1
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
10. Si se incrementa la frecuencia del voltaje de fuente, la corriente a través de los resistores
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
11. Si disminuye la frecuencia del voltaje de fuente, la corriente a través de los capacitores
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia

Consulte la figura 15-103.

12. Si C_3 se abre, el voltaje del punto B a tierra
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
13. Si C_2 se abre, el voltaje del punto B a tierra
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
14. Si se desarrolla un corto del punto C a tierra, el voltaje del punto A a tierra
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
15. Si el capacitor C_3 se abre, el voltaje de B a D
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
16. Si la frecuencia de la fuente se incrementa, el voltaje del punto C a tierra
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
17. Si la frecuencia de la fuente se incrementa, la corriente de la fuente
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
18. Si R_2 se pone en cortocircuito, el voltaje a través de C_1
(a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

PARTE 1: CIRCUITOS EN SERIE

SECCIÓN 15–1 El sistema de los números complejos

1. ¿Cuáles son las dos características de una cantidad indicada mediante un número complejo?
2. Localice los siguientes números en el plano complejo:
(a) $+6$ (b) -2 (c) $+j3$ (d) $-j8$
3. Localice los puntos representados por cada una de las siguientes coordenadas en el plano complejo:
(a) $3, j5$ (b) $-7, j1$ (c) $-10, -j10$

*4. Determine las coordenadas de cada punto que tenga igual magnitud pero esté localizado a 180° de cada uno de los puntos del problema 3.

*5. Determine las coordenadas de cada punto que tenga igual magnitud pero esté localizado a 90° de los puntos del problema 3.

6. A continuación se describen puntos localizados en el plano complejo. Exprese cada punto como un número complejo en forma rectangular:

(a) 3 unidades a la derecha del origen sobre el eje real, y 5 unidades hacia arriba sobre el eje j.

(b) 2 unidades a la izquierda del origen sobre el eje real, y 1.5 unidades hacia arriba sobre el eje j.

(c) 10 unidades a la izquierda del origen sobre el eje real, y 14 unidades hacia abajo sobre el eje $-j$.

7. ¿Cuál es el valor de la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos lados son 10 y 15?

8. Convierta cada uno de los siguientes números rectangulares a forma polar:

(a) $40 - j40$ **(b)** $50 - j200$ **(c)** $35 - j20$ **(d)** $98 + j45$

9. Convierta cada uno de los siguientes números polares a forma rectangular:

(a) $1000\angle -50°$ **(b)** $15\angle 160°$ **(c)** $25\angle -135°$ **(d)** $3\angle 180°$

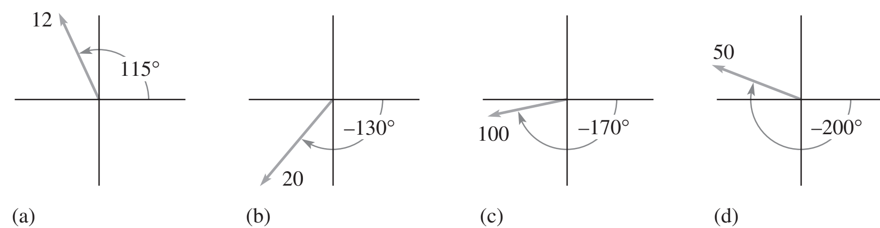
10. Exprese cada uno de los siguientes números polares utilizando un ángulo negativo para reemplazar al positivo.

(a) $10\angle 120°$ **(b)** $32\angle 85°$ **(c)** $5\angle 310°$

11. Identifique el cuadrante en el cual se localiza cada uno de los puntos del problema 8.

12. Identifique el cuadrante en el cual se localiza cada uno de los puntos del problema 10.

13. Escriba las expresiones polares utilizando ángulos positivos para cada uno de los fasores de la figura 15-83.



▲ **FIGURA 15–83**

14. Sume los siguientes conjuntos de números complejos:

(a) $9 + j3$ y $5 + j8$ **(b)** $3.5 - j4$ y $2.2 + j6$

(c) $-18 + j23$ y $30 - j15$ **(d)** $12\angle 45°$ y $20\angle 32°$

(e) $3.8\angle 75°$ y $1 + j1.8$ **(f)** $50 - j39$ y $60\angle -30°$

15. Realice las siguientes sustracciones:

(a) $(2.5 + j1.2) - (1.4 + j0.5)$ **(b)** $(-45 - j23) - (36 + j12)$

(c) $(8 - j4) - 3\angle 25°$ **(d)** $48\angle 135° - 33\angle -60°$

16. Multiplique los siguientes números:

(a) $4.5\angle 48°$ y $3.2\angle 90°$ **(b)** $120\angle -220°$ y $95\angle 200°$

(c) $-3\angle 150°$ y $4 - j3$ **(d)** $67 + j84$ y $102\angle 40°$

(e) $15 - j10$ y $-25 - j30$ **(f)** $0.8 + j0.5$ y $1.2 - j1.5$

17. Realice las siguientes divisiones:

(a) $\dfrac{8\angle 50°}{2.5\angle 39°}$ **(b)** $\dfrac{63\angle -91°}{9\angle 10°}$ **(c)** $\dfrac{28\angle 30°}{14 - j12}$ **(d)** $\dfrac{40 - j30}{16 + j8}$

18. Realice las siguientes operaciones:

(a) $\dfrac{2.5\angle 65° - 1.8\angle -23°}{1.2\angle 37°}$ **(b)** $\dfrac{(100\angle 15°)(85 - j150)}{25 + j45}$

(c) $\dfrac{(250\angle 90° + 175\angle 75°)(50 - j100)}{(125 + j90)(35\angle 50°)}$ **(d)** $\dfrac{(1.5)^2(3.8)}{1.1} + j\left(\dfrac{8}{4} - j\dfrac{4}{2}\right)$

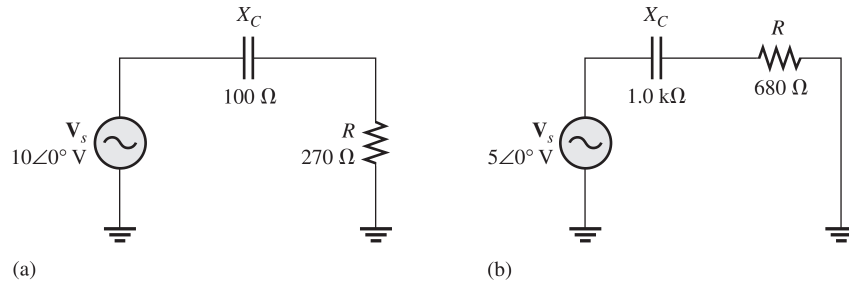
SECCIÓN 15–2 Respuesta sinusoidal de circuitos *RC* en serie

19. Se aplica un voltaje sinusoidal a 8 kHz a un circuito *RC* en serie. ¿Cuál es la frecuencia del voltaje a través del resistor? ¿A través del capacitor?

20. ¿Cuál es la forma de onda de la corriente en el circuito del problema 19?

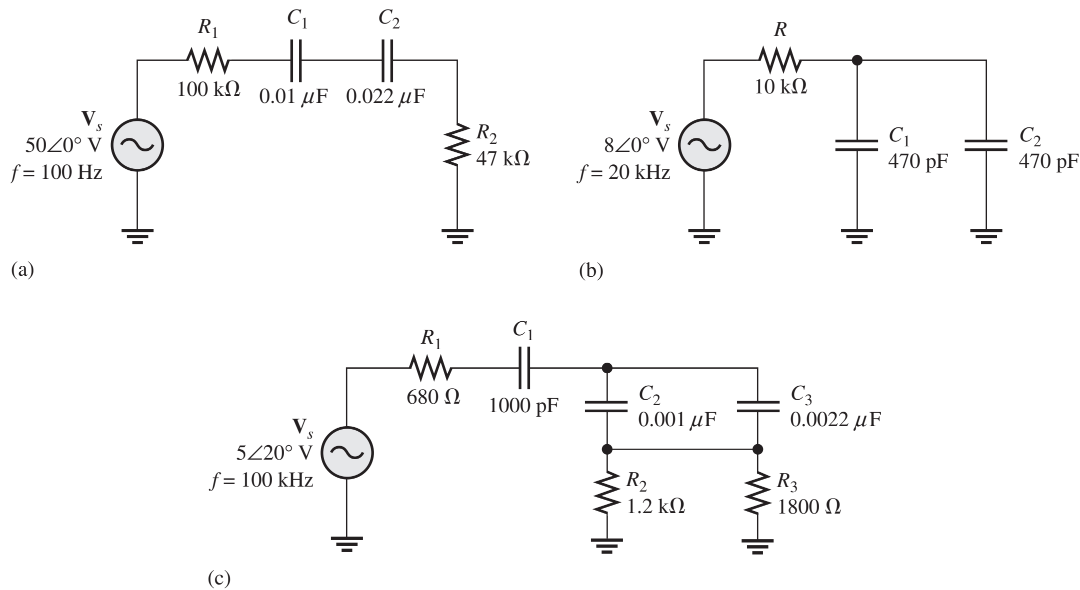
SECCIÓN 15–3 Impedancia de circuitos *RC* en serie

21. Exprese la impedancia total de cada circuito mostrado en la figura 15-84 tanto en forma polar como rectangular.



▲ FIGURA 15–84

22. Determine la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase en cada circuito de la figura 15-85.



▲ FIGURA 15–85

23. Para el circuito de la figura 15-86, determine la impedancia expresada en forma rectangular para cada una de las siguientes frecuencias:

(a) 100 Hz **(b)** 500 Hz **(c)** 1 kHz **(d)** 2.5 kHz

24. Repita el problema 23 con $C = 0.0047\ \mu\text{F}$.

25. Determine los valores de R y X_C en un circuito *RC* en serie para los siguientes valores de impedancia total:

(a) $\mathbf{Z} = 33\ \Omega - j50\ \Omega$ **(b)** $\mathbf{Z} = 300\angle{-25°}\ \Omega$

(c) $\mathbf{Z} = 1.8\angle{-67.2°}\ \text{k}\Omega$ **(d)** $\mathbf{Z} = 789\angle{-45°}\ \Omega$

SECCIÓN 15–4 Análisis de circuitos *RC* en serie

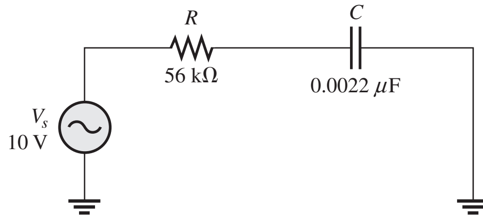
26. Exprese la corriente en forma polar para cada circuito de la figura 15-84.

27. Calcule la corriente total en cada circuito de la figura 15-85 y exprésela en forma polar.

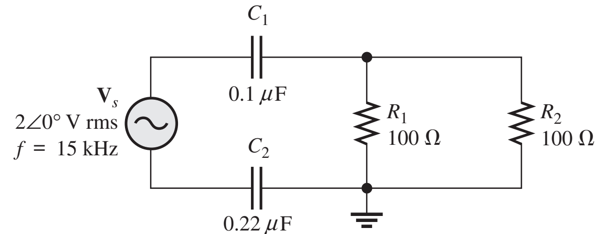
28. Determine el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente para cada circuito de la figura 15-85.

29. Repita el problema 28 para el circuito de la figura 15-86, con $f = 5$ kHz.

30. Para el circuito de la figura 15-87, trace el diagrama fasorial que muestre todos los voltajes y la corriente total. Indique los ángulos de fase.



▲ **FIGURA 15–86**

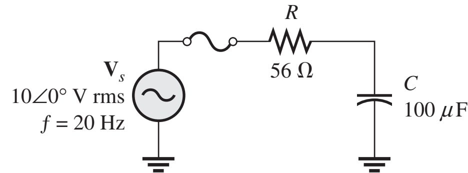


▲ **FIGURA 15–87**

31. Para el circuito de la figura 15-88, determine lo siguiente en forma polar:

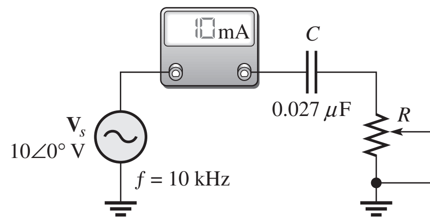
(a) $\mathbf{Z}$ **(b)** $\mathbf{I}_{tot}$ **(c)** $\mathbf{V}_R$ **(d)** $\mathbf{V}_C$

▶ **FIGURA 15–88**

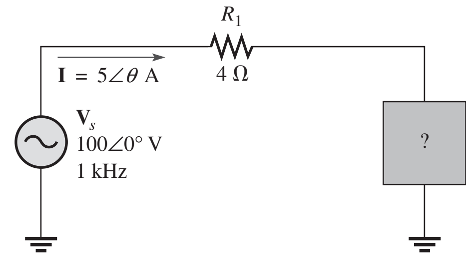


***32.** ¿A qué valor se debe ajustar el reóstato de la figura 15-89 para hacer que la corriente total sea de 10 mA? ¿Cuál es el ángulo resultante?

***33.** Determine el o los elementos dispuestos en serie que deben ser instalados en el bloque de la figura 15-90 para satisfacer los siguientes requerimientos: $P_{\text{real}} = 400$ W y un factor de potencia de adelanto (I_{tot} aparece adelantada con respecto a V_s).



▲ **FIGURA 15–89**

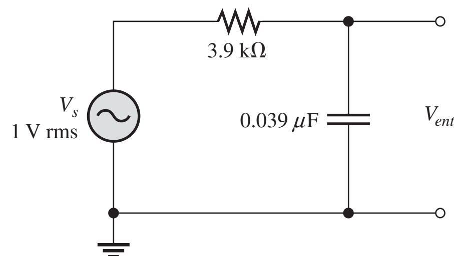


▲ **FIGURA 15–90**

34. Para el circuito de retraso de la figura 15-91, determine el desplazamiento de fase entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida para cada una de las siguientes frecuencias:

(a) 1 Hz **(b)** 100 Hz **(c)** 1 kHz **(d)** 10 kHz

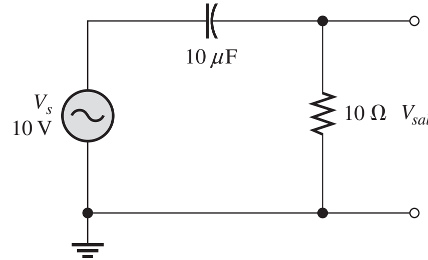
▶ **FIGURA 15–91**



35. El circuito de retraso de la figura 15-91 también actúa como filtro pasabajas. Trace una curva de respuesta para este circuito marcando el voltaje de salida contra la frecuencia de 0 Hz a 10 kHz en incrementos de 1 kHz.

36. Repita el problema 34 para el circuito de adelanto de la figura 15-92.

▶ FIGURA 15–92



37. Trace la curva de respuesta a la frecuencia de amplitud de salida para el circuito de adelanto de la figura 15-92 con un intervalo de frecuencia de 0 Hz a 10 kHz en incrementos de 1 kHz.

38. Trace el diagrama fasorial de voltaje para el circuito de la figura 15-91 para una frecuencia de 5 kHz con $V_s = 1$ V rms.

39. Repita el problema 38 para el circuito de la figura 15-92. $V_s = 10$ V rms y $f = 1$ kHz.

PARTE 2: CIRCUITOS EN PARALELO

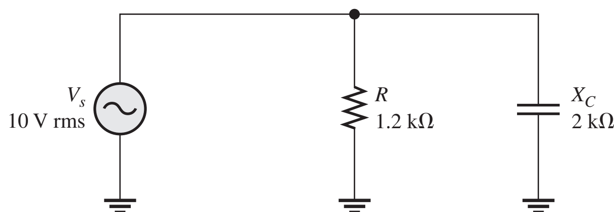
SECCIÓN 15–5 Impedancia y admitancia de circuitos *RC* en paralelo

40. Determine la impedancia y exprésela en forma polar para el circuito de la figura 15-93.

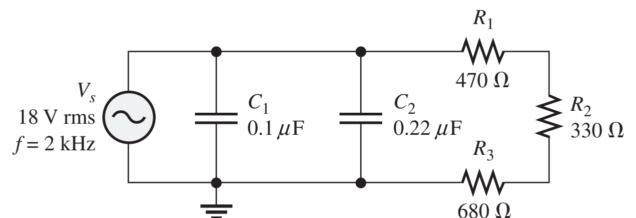
41. Determine la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase en la figura 15-94.

42. Repita el problema 41 para las siguientes frecuencias:

(a) 1.5 kHz **(b)** 3 kHz **(c)** 5 kHz **(d)** 10 kHz



▲ FIGURA 15–93

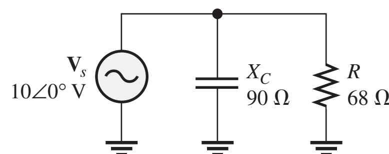


▲ FIGURA 15–94

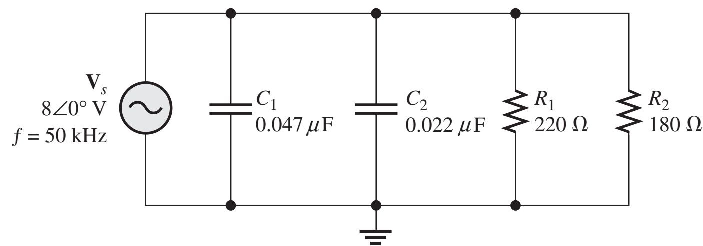
SECCIÓN 15–6 Análisis de circuitos *RC* en paralelo

43. Para el circuito de la figura 15-95, encuentre todas las corrientes y los voltajes en forma polar.

▶ FIGURA 15–95



44. Para el circuito en paralelo de la figura 15-96, encuentre la magnitud de cada corriente de rama y la corriente total. ¿Cuál es el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total?

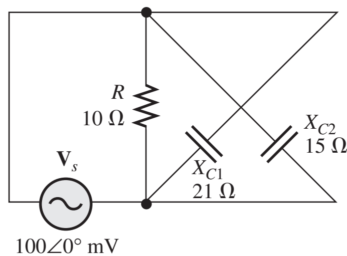


▲ **FIGURA 15–96**

45. Para el circuito de la figura 15-97, determine lo siguiente:

(a) $\mathbf{Z}$ **(b)** $\mathbf{I}_R$ **(c)** $\mathbf{I}_{C(tot)}$ **(d)** $\mathbf{I}_{tot}$ **(e)** θ

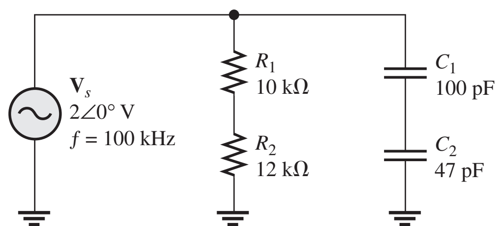
▶ **FIGURA 15–97**



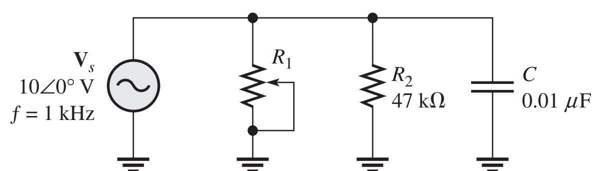
46. Repita el problema 45 con $R = 5.6\ \text{k}\Omega$, $C_1 = 0.047\ \mu\text{F}$, $C_2 = 0.022\ \mu\text{F}$, y $f = 500$ Hz.

***47.** Cambie el circuito de la figura 15-98 a una forma equivalente dispuesta en serie.

▶ **FIGURA 15–98**



***48.** Determine el valor al cual R_1 debe ser ajustado para obtener un ángulo de fase de 30° entre el voltaje de fuente y la corriente total en la figura 15-99.



▲ **FIGURA 15–99**

PARTE 3: CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

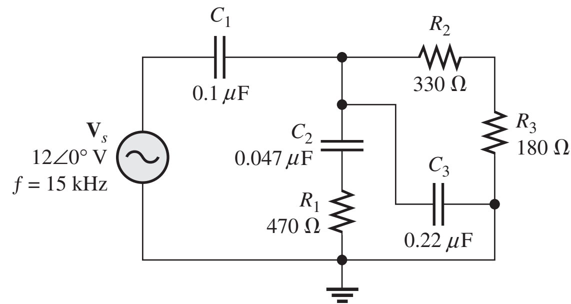
SECCIÓN 15–7 Análisis de circuitos *RC* en serie-paralelo

49. Determine los voltajes en forma polar a través de cada elemento de la figura 15-100. Trace el diagrama fasorial de voltaje.

50. ¿Es el circuito de la figura 15-100 predominantemente resistivo o predominantemente capacitivo?

51. Encuentre la corriente a través de cada rama y la corriente total en la figura 15-100. Exprese las corrientes en forma polar. Trace el diagrama fasorial de corriente.

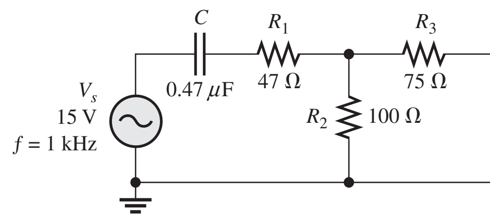
▶ FIGURA 15–100



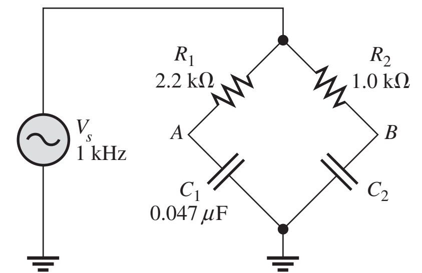
52. Para el circuito de la figura 15-101, determine lo siguiente:

(a) $\mathbf{I}_{tot}$ **(b)** θ **(c)** $\mathbf{V}_{R1}$ **(d)** $\mathbf{V}_{R2}$ **(e)** $\mathbf{V}_{R3}$ **(f)** $\mathbf{V}_{C}$

*__53.__ Determine el valor de C_2 en la figura 15-102 cuando $V_A = V_B$.



▲ FIGURA 15–101

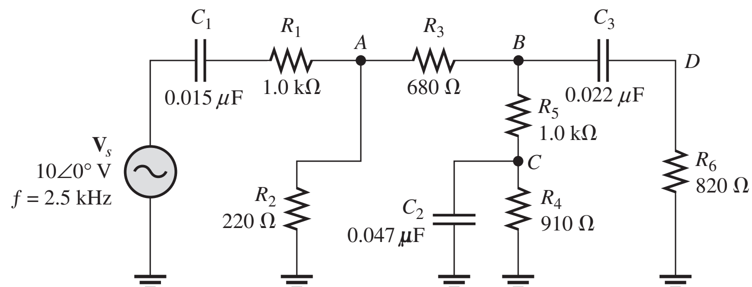


▲ FIGURA 15–102

*__54.__ Determine el voltaje y su ángulo de fase en cada punto rotulado en la figura 15-103.

*__55.__ Encuentre la corriente a través de cada componente en la figura 15-103.

*__56.__ Trace el diagrama fasorial de voltaje y corriente para la figura 15-103.



▲ FIGURA 15–103

PARTE 4: TEMAS ESPECIALES

SECCIÓN 15–8 Potencia en circuitos *RC*

57. En un circuito *RC* en serie, la potencia real es de 2 W y la potencia reactiva de 3.5 VAR. Determine la potencia aparente.

58. En la figura 15-88, ¿cuáles son la potencia real y la potencia reactiva?

59. ¿Cuál es el factor de potencia para el circuito de la figura 15-98?

60. Determine P_{real}, P_r, P_a, y *FP* para el circuito de la figura 15-101. Trace el triángulo de potencia.

***61.** Una sola fuente de 240 V y 60 Hz alimenta dos cargas. La carga *A* tiene impedancia de 50 Ω y factor de potencia de 0.85. La carga *B* tiene impedancia de 72 Ω y factor de potencia de 0.95.

(a) ¿Cuánta corriente consume cada carga?

(b) ¿Cuál es la potencia reactiva en cada carga?

(c) ¿Cuál es la potencia real en cada carga?

(d) ¿Cuál es la potencia aparente en cada carga?

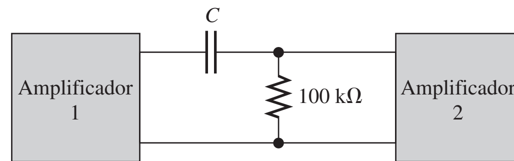
(e) ¿Cuál carga tiene más caída de voltaje a lo largo de las líneas que la conectan a la fuente?

SECCIÓN 15–9 Aplicaciones básicas

62. Calcule la frecuencia de oscilación para el circuito de la figura 15-62 si todos los capacitores son de 0.0022 μF y todos los resistores de 10 kΩ.

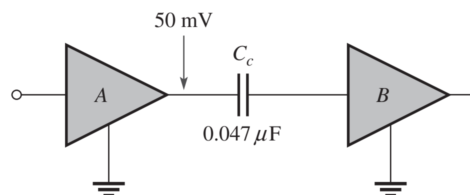
***63.** ¿Qué valor de capacitor de acoplamiento se requiere en la figura 15-104 de modo que el voltaje de señal a la entrada del amplificador 2 sea por lo menos un 70.7% del voltaje de señal a la salida del amplificador 1 cuando la frecuencia es de 20 Hz?

▶ FIGURA 15–104



64. El valor rms del voltaje de señal que sale del amplificador *A* en la figura 15-105 es de 50 mV. Si la resistencia de entrada al amplificador *B* es de 10 kΩ, ¿qué tanto de la señal se pierde debido al capacitor de acoplamiento cuando la frecuencia es de 3 kHz?

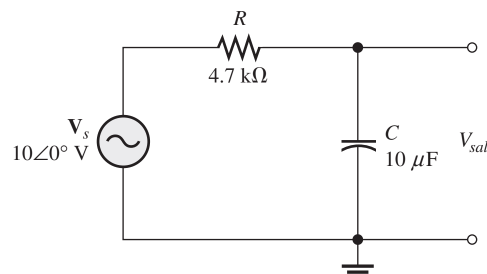
▶ FIGURA 15–105



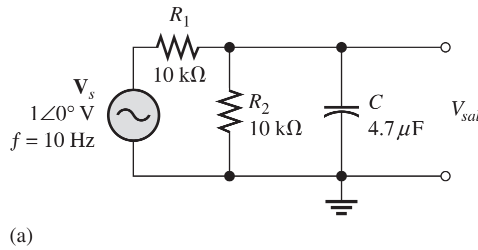
SECCIÓN 15–10 Localización de fallas

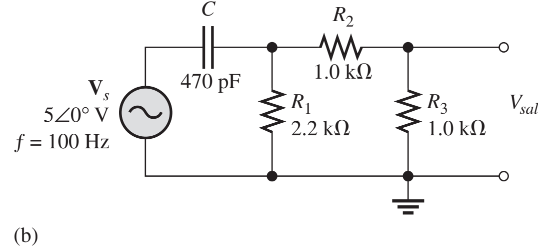
65. Suponga que el capacitor de la figura 15-106 tiene fugas en exceso. Muestre cómo afecta esta degradación al voltaje de salida y al ángulo de fase, suponiendo que la resistencia de fuga es de 5 kΩ y la frecuencia de 10 Hz.

▶ FIGURA 15–106



*__66.__ Los capacitores de la figura 15-107 han desarrollado un resistencia de fuga de 2 kΩ. Determine los voltajes de salida en esta condición para cada circuito.





▲ **FIGURA 15–107**

67. Determine el voltaje de salida para el circuito de la figura 15-107(a) para cada uno de los siguientes modos de falla, y compárelo con la salida correcta:
(a) R_1 abierto **(b)** R_2 abierto **(c)** *C* abierto **(d)** *C* en cortocircuito

68. Determine el voltaje de salida para el circuito de la figura 15-107(b) para cada uno de los siguientes modos de falla, y compárelo con la salida correcta:
(a) *C* abierto **(b)** *C* en cortocircuito **(c)** R_1 abierto **(d)** R_2 abierto **(e)** R_3 abierto



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren del CD-ROM Multisim.

69. Abra el archivo P15-69 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.
70. Abra el archivo P15-70 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.
71. Abra el archivo P15-71 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.
72. Abra el archivo P15-72 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.
73. Abra el archivo P15-73 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.
74. Abra el archivo P15-74 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.
75. Abra el archivo P15-75 y determine la respuesta a la frecuencia para el filtro.
76. Abra el archivo P15-76 y determine la respuesta a la frecuencia para el filtro.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 15–1 El sistema de los números complejos

1. 2.828∠45°; primero
2. $3.54 - j3.54$, cuarto
3. $4 + j1$
4. $3 + j7$
5. 16∠110°
6. 5∠15°

SECCIÓN 15–2 Respuesta sinusoidal de circuitos *RC* en serie

1. La frecuencia del voltaje es de 60 Hz. La frecuencia de la corriente es de 60 Hz.
2. La reactancia capacitiva provoca el desplazamiento de fase.
3. El ángulo de fase se aproxima más a 0°.

SECCIÓN 15–3 Impedancia de circuitos *RC* en serie

1. $R = 150\ \Omega$; $X_C = 220\ \Omega$
2. $\mathbf{Z} = 33\ \text{k}\Omega - j50\ \text{k}\Omega$
3. $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = 59.9\ \text{k}\Omega$; $\theta = -\tan^{-1}(X_C/R) = -56.6°$

SECCIÓN 15–4 Análisis de circuitos *RC* en serie

1. $V_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = 7.21$ V
2. $\theta = -\tan^{-1}(X_C/R) = -56.3°$
3. $\theta = 90°$
4. Cuando f se incrementa, X_C, Z y θ disminuyen.
5. $\phi = -90° + \tan^{-1}(X_C/R) = -62.8°$
6. $V_{sal} = (R/\sqrt{R^2 + X_C^2})V_{ent} = 8.90$ V rms

SECCIÓN 15–5 Impedancia y admitancia de circuitos *RC* en paralelo

1. La conductancia es el recíproco de la resistencia, la susceptancia capacitiva es el recíproco de la reactancia capacitiva, y la admitancia es el recíproco de la impedancia.
2. $Y = 1/Z = 1/100\ \Omega = 10$ mS
3. $\mathbf{Y} = 1/\mathbf{Z} = 25.1\angle 32.1°\ \mu$S
4. $\mathbf{Z} = 39.8\angle -32.1°$ kΩ

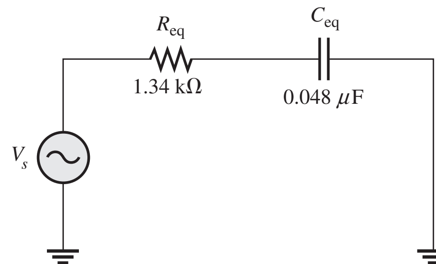
SECCIÓN 15–6 Análisis de circuitos *RC* en paralelo

1. $I_{tot} = V_s Y = 21$ mA
2. $I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = 18$ mA; $\theta = \tan^{-1}(I_C/I_R) = 56.3°$; θ es con respecto al voltaje aplicado.
3. $\theta = 90°$

SECCIÓN 15–7 Análisis de circuitos RC en serie-paralelo

1. Vea la figura 15-108.
2. $\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{V}_s/\mathbf{I}_{tot} = 36.9\angle -51.6°\ \Omega$

▶ FIGURA 15–108



SECCIÓN 15–8 Potencia en circuitos *RC*

1. La disipación de potencia se debe a la resistencia.
2. $FP = \cos\theta = 0.707$
3. $P_{real} = I^2R = 1.32$ kW; $P_r = I^2X_C = 1.84$ kVAR; $P_a = I^2Z = 2.26$ kVA

SECCIÓN 15–9 Aplicaciones básicas

1. 180°
2. La salida es a través del capacitor.

SECCIÓN 15–10 Localización de fallas

1. La resistencia de fuga actúa en paralelo con C, lo cual modifica la constante de tiempo del circuito.
2. El capacitor está abierto.
3. Un resistor en serie abierto o el capacitor en cortocircuito producirán 0 V a través del capacitor.

Una aplicación de circuito

1. Un valor más bajo del capacitor de acoplamiento incrementará la frecuencia a la cual ocurre una caída de voltaje significativa.

2. $V_B = 3.16$ V dc

3. $V_B = 10$ mV rms

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

15–1 **(a)** Primero **(b)** Cuarto **(c)** Tercero **(d)** Segundo

15–2 $29.2\angle 52°$

15–3 $70.1 - j34.2$

15–4 $-1 - j8$

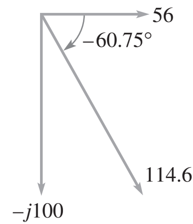
15–5 $-13.5 - j4.5$

15–6 $1500\angle -50°$

15–7 $4\angle -42°$

15–8 $114.612390255\angle -60.75 \ldots$

▶ **FIGURA 15–109**



Vea la figura 15-109.

15–9 $\mathbf{V}_s = 2.56\angle -38.5°$ V

15–10 $\mathbf{I} = 3.80\angle 33.4°$ mA

15–11 $Z = 15.9\ \text{k}\Omega, \theta = -86.4°$

15–12 El retraso de fase se incrementa.

15–13 El voltaje de salida disminuye.

15–14 El adelanto de fase disminuye.

15–15 El voltaje de salida se incrementa.

15–16 $\mathbf{Z} = 24.3\angle -76.0°\ \Omega$

15–17 $\mathbf{Y} = 4.60\angle 48.8°$ mS

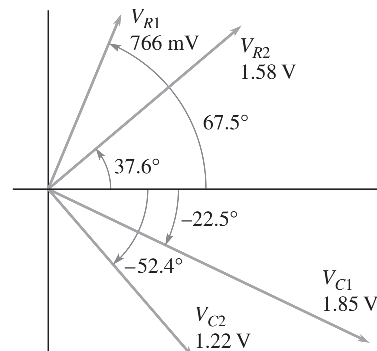
15–18 $\mathbf{I} = 6.16\angle 42.4°$ mA

15–19 $\mathbf{I}_{tot} = 117\angle 31.0°$ mA

15–20 $R_{\text{eq}} = 8.99\ \text{k}\Omega, X_{C(\text{eq})} = 4.38\ \text{k}\Omega$

15–21 $\mathbf{V}_1 = 7.05\angle 8.9°$ V, $\mathbf{V}_2 = 3.21\angle -18.9°$ V

▶ **FIGURA 15–110**



15–22 $\mathbf{V}_{R1} = 766\angle 67.5°$ mV; $\mathbf{V}_{C1} = 1.85\angle -22.5°$ V; $\mathbf{V}_{R2} = 1.58\angle 37.6°$ V; $\mathbf{V}_{C2} = 1.22\angle -52.4°$ V; Vea la figura 15-110.

15–23 $PF = 0.146$

15–24 $P_{\text{real}} = 213$ mW

15–25 1.60 kHz

15–26 $V_{sal} = 7.29$ V

15–27 Resistor abierto

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (a) **3.** (d) **4.** (c) **5.** (c) **6.** (a) **7.** (b)
8. (c) **9.** (d) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (b) **13.** (a) **14.** (d)
15. (b) **16.** (a) **17.** (d) **18.** (c) **19.** (b) **20.** (d) **21.** (d)
22. (c) **23.** (b)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (a) **2.** (b) **3.** (a) **4.** (a) **5.** (b) **6.** (c) **7.** (c) **8.** (a)
9. (a) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (a) **13.** (a) **14.** (b) **15.** (a) **16.** (b)
17. (a) **18.** (a)

CIRCUITOS *RL* 16

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

PARTE 1: CIRCUITOS EN SERIE

- Describir la relación entre corriente y voltaje en un circuito *RL* en serie
- Determinar la impedancia de un circuito *RL* en serie
- Analizar un circuito *RL* en serie

PARTE 2: CIRCUITOS EN PARALELO

- Determinar impedancia y admitancia en un circuito *RL* en paralelo
- Analizar un circuito *RL* en paralelo

PARTE 3: CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

- Analizar circuitos *RL* en serie-paralelo

PARTE 4: TEMAS ESPECIALES

- Determinar potencia en circuitos *RL*
- Describir dos ejemplos de aplicaciones de circuito *RL*
- Localizar fallas en circuitos *RL*

TÉRMINOS CLAVE

- Reactancia inductiva
- Susceptancia inductiva (B_L)

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de un circuito, usted utilizará sus conocimientos de circuitos *RL* para determinar, basado en mediciones de parámetros, el tipo de circuitos de filtrado que están encapsulados en módulos sellados y sus valores de componentes.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudiarán circuitos *RL* dispuestos en serie y en paralelo. Los análisis de circuitos *RL* y RC son similares. La diferencia principal es que las respuestas de fase son opuestas: la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia, en tanto que la reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia.

Un circuito *RL* contiene tanto resistencia como inductancia. En este capítulo, se presentan los circuitos *RL* básicos en serie y en paralelo y sus respuestas a voltajes sinusoidales de ca. Se analizan combinaciones en serie-paralelo. Se introducen las potencias real, reactiva y aparente en circuitos *RL* y algunas aplicaciones básicas de éstos. Las aplicaciones de circuitos *RL* incluyen filtros y reguladores de conmutación. También se aborda la localización de fallas en este capítulo.

ALTERNATIVAS DE COBERTURA

Si usted elige la alternativa 1 de estudiar todo el capítulo 15 acerca de circuitos RC, entonces todo este capítulo deberá ser estudiado a continuación.

Si prefiere la alternativa 2 de estudiar los circuitos reactivos al principio del capítulo 15 con base en las cuatro partes principales, entonces la parte apropiada de este capítulo deberá ser estudiada a continuación, seguida por la parte correspondiente del capítulo 17.

Parte 1

CIRCUITOS EN SERIE

16–1 RESPUESTA SINUSOIDAL DE CIRCUITOS *RL* EN SERIE

De igual forma que en el circuito *RC*, en un circuito *RL* en serie todas las corrientes y todos los voltajes son sinusoidales cuando el voltaje de entrada es sinusoidal. La inductancia provoca un desplazamiento de fase entre el voltaje y la corriente que depende de los valores relativos de la resistencia y la reactancia inductiva.

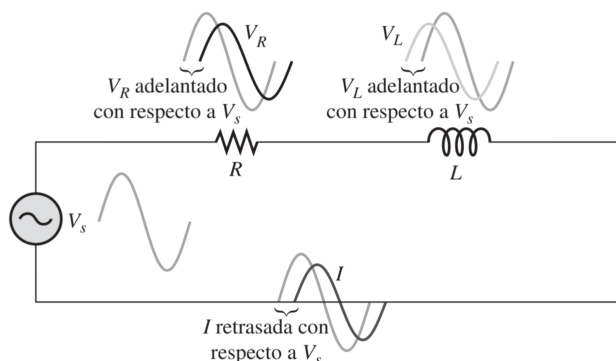
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir la relación entre corriente y voltaje en un circuito *RL* en serie**
  - Analizar las formas de onda de voltaje y corriente
  - Analizar el desplazamiento de fase

En un circuito *RL*, el voltaje en el resistor y la corriente se retrasan con respecto al voltaje de la fuente. El voltaje en el inductor se adelanta al voltaje de fuente. Idealmente, el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje en el inductor siempre es de 90°. Estas relaciones de fase generalizadas se indican en la figura 16-1. Advierta que difieren de las del circuito *RC* estudiado en el capítulo 15.

Las amplitudes y las relaciones de fase de los voltajes y de la corriente dependen de los valores de la resistencia y la **reactancia inductiva**. Cuando un circuito es puramente inductivo, el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total es de 90°, y la corriente va retrasada con respecto al voltaje. Cuando existe una combinación tanto de resistencia como de reactancia inductiva en un circuito, el ángulo de fase se encuentra entre 0° y 90°, según sean los valores relativos de la resistencia y la reactancia inductiva.

Recordemos que los inductores prácticos tienen resistencia de devanado, capacitancia entre los devanados, y otros factores que impiden se comporten como un componente ideal. En circuitos



▲ **FIGURA 16–1**

Ilustración de respuesta sinusoidal con relaciones de fase generales de V_R, V_L e I con respecto al voltaje de fuente. V_R e I están en fase, en tanto que V_R y V_I se encuentran desfasados en 90° entre sí.

prácticos, estos efectos pueden resultar significativos; sin embargo, para el propósito de aislar los efectos inductivos, los inductores serán tratados como ideales en este capítulo (excepto en la Aplicación de circuito).

REPASO DE LA SECCIÓN 16-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Se aplica voltaje sinusoidal con frecuencia de 1 kHz a un circuito *RL*. ¿Cuál es la frecuencia de la corriente resultante?
2. Cuando la resistencia en un circuito *RL* es más grande que la reactancia inductiva, ¿el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total se aproxima a 0 o a 90°?

16–2 IMPEDANCIA DE CIRCUITOS *RL* EN SERIE

La impedancia de un circuito *RL* en serie se compone de resistencia y reactancia inductiva, y es la oposición total a la corriente sinusoidal. Su unidad es el ohm. La impedancia también provoca una diferencia de fase entre la corriente total y el voltaje de fuente. Por consiguiente, la impedancia está constituida por un componente de magnitud y un componente de ángulo de fase.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la impedancia de un circuito *RL* en serie**
  - Expresar la reactancia inductiva en forma compleja
  - Expresar la impedancia total en forma compleja
  - Calcular la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase

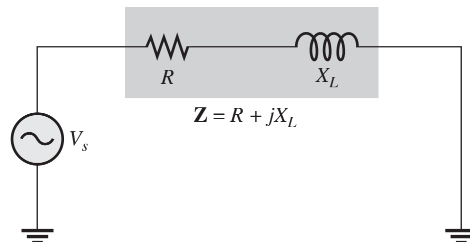
La resistencia y la reactancia inductiva determinan la impedancia de un circuito *RL* dispuesto en serie. La reactancia inductiva se expresa como cantidad fasorial en forma rectangular de la manera siguiente:

$$\mathbf{X}_L = jX_L$$

En el circuito *RL* en serie de la figura 16-2, la impedancia total es la suma fasorial de R y jX_L y se expresa como

$$\mathbf{Z} = R + jX_L$$

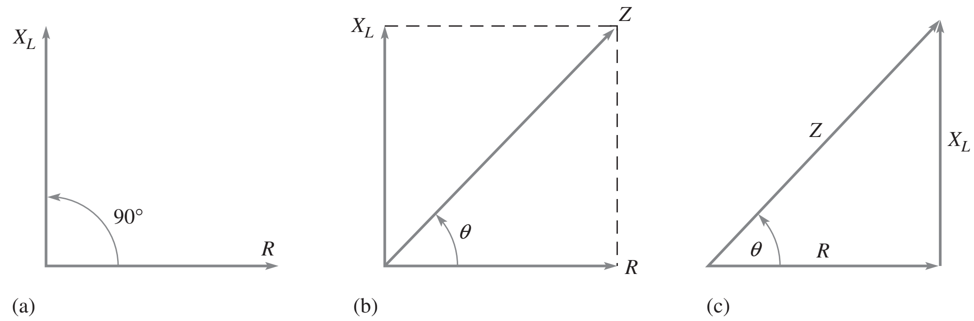
Ecuación 16–1



◀ **FIGURA 16–2**

Impedancia en un circuito *RL* en serie.

En el análisis de ca, R y X_L son como aparecen en el diagrama fasorial de la figura 16-3(a), donde X_L forma un ángulo de +90° con respecto a R. Esta relación se deriva del hecho de que el voltaje en el inductor se adelanta en 90° a la corriente, y por tanto al voltaje en el resistor. Como $\mathbf{Z}$ es la suma fasorial de R y jX_L, su representación fasorial es como aparece en la figura 16-3(b). Un reposicionamiento de los fasores, según muestra la parte (c), forma un triángulo rectángulo llamado *triángulo de impedancia*. La longitud de cada fasor representa la magnitud de la cantidad, y θ es el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente en el circuito *RL*.



▲ **FIGURA 16–3**

Desarrollo del triángulo de impedancia para un circuito *RL* en serie.

La magnitud de la impedancia del circuito *RL* en serie se expresa en función de la resistencia y la reactancia como

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

La magnitud de la impedancia se expresa en ohms.

El ángulo de fase, θ, se expresa como

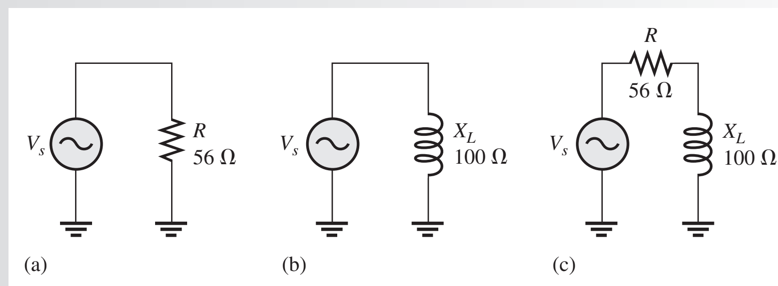
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

Al combinar la magnitud y el ángulo, la impedancia se puede expresar en forma polar como

Ecuación 16–2

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

EJEMPLO 16–1 Para cada uno de los circuitos mostrados en la figura 16-4, escriba la expresión fasorial para la impedancia tanto en forma polar como rectangular.



▲ **FIGURA 16–4**

Solución Para el circuito de la figura 16-4(a), la impedancia es

$$\mathbf{Z} = R + j0 = R = \mathbf{56\ \Omega} \qquad \text{en forma rectangular } (X_L = 0)$$

$$\mathbf{Z} = R\angle 0° = \mathbf{56\angle 0°\ \Omega} \qquad \text{en forma polar}$$

La impedancia es simplemente igual a la resistencia, y el ángulo de fase es cero porque la resistencia pura no introduce un desplazamiento de fase.

Para el circuito de la figura 16-4(b), la impedancia es

$$\mathbf{Z} = 0 + jX_L = \mathbf{j100\ \Omega} \qquad \text{en forma rectangular } (R = 0)$$
$$\mathbf{Z} = X_L\angle 90° = \mathbf{100\angle 90°\ \Omega} \qquad \text{en forma polar}$$

La impedancia es igual a la reactancia inductiva en este caso, y el ángulo de fase es de +90° porque la inductancia propicia que la corriente se retrase en 90° con respecto al voltaje.

Para el circuito de la figura 16-4(c), la impedancia en forma rectangular es

$$\mathbf{Z} = R + jX_L = \mathbf{56\ \Omega + j100\ \Omega}$$

La impedancia en forma polar es

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$
$$= \sqrt{(56\ \Omega)^2 + (100\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{56\ \Omega}\right) = \mathbf{115\angle 60.8°\ \Omega}$$

En este caso, la impedancia es la suma fasorial de la resistencia y la reactancia inductiva. Los valores relativos de X_L y R fijan el ángulo de fase.

Problema relacionado* En un circuito *RL* en serie, $R = 1.8\ k\Omega$ y $X_L = 950\ \Omega$. Exprese la impedancia tanto en forma rectangular como polar.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

REPASO DE LA SECCIÓN 16-2

1. **La impedancia de cierto circuito *RL* es de 150 Ω + j220 Ω. ¿Cuál es el valor de la resistencia? ¿Cuál es la reactancia inductiva?**
2. **La resistencia total de un circuito *RL* en serie es de 33 kΩ y la reactancia inductiva de 50 kΩ. Escriba en forma rectangular la expresión fasorial para la impedancia. Convierta la impedancia a forma polar.**

16–3 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RL* EN SERIE

En esta sección, se utilizan la ley de Ohm y la ley del voltaje de Kirchhoff para realizar el análisis de circuitos *RL* en serie y determinar voltaje, corriente e impedancia. También se examinan circuitos *RL* de adelanto y retraso.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un circuito *RL* en serie**
  - Aplicar la ley de Ohm y la ley del voltaje de Kirchhoff a circuitos *RL* en serie
  - Expresar los voltajes y la corriente en cantidades fasoriales
  - Mostrar cómo varían la impedancia y el ángulo de fase con la frecuencia
  - Presentar y analizar el circuito *RL* de adelanto
  - Presentar y analizar el circuito *RL* de retraso

Ley de Ohm

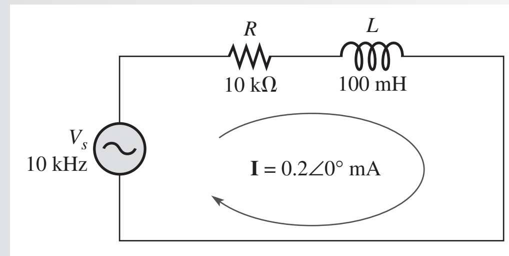
La aplicación de la ley de Ohm a circuitos *RL* en serie implica el uso de las cantidades fasoriales de **Z**, **V** e **I**. Las tres formas equivalentes de la ley de Ohm fueron establecidas en el capítulo 15 para circuitos *RC*. También se aplican a circuitos *RL* y se vuelven a formular aquí:

$$\mathbf{V} = \mathbf{IZ} \qquad \mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}} \qquad \mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$$

Recordemos que, como los cálculos con la ley de Ohm implican operaciones de multiplicación y división, el voltaje, la corriente y la impedancia deberán expresarse en forma polar.

EJEMPLO 16–2

La corriente que aparece en la figura 16-5 está expresada en forma polar como $\mathbf{I} = 0.2\angle 0°$ mA. Determine el voltaje de fuente expresado en forma polar, y trace un diagrama fasorial que muestre la relación entre el voltaje de la fuente y la corriente.



▲ FIGURA 16–5

Solución La magnitud de la reactancia inductiva es

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10\,\text{kHz})(100\,\text{mH}) = 6.28\,\text{k}\Omega$$

La impedancia en forma rectangular es

$$\mathbf{Z} = R + jX_L = 10\,\text{k}\Omega + j6.28\,\text{k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

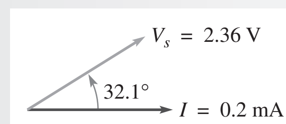
$$= \sqrt{(10\,\text{k}\Omega)^2 + (6.28\,\text{k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{6.28\,\text{k}\Omega}{10\,\text{k}\Omega}\right) = \mathbf{11.8\angle 32.1°\,k\Omega}$$

Use la ley de Ohm para determinar el voltaje de la fuente.

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{IZ} = (0.2\angle 0°\,\text{mA})(11.8\angle 32.1°\,\text{k}\Omega) = \mathbf{2.36\angle 32.1°\,V}$$

La magnitud del voltaje de la fuente es de 2.36 V a un ángulo de 32.1° con respecto a la corriente; es decir, el voltaje se adelanta en 32.1° a la corriente, como se muestra en el diagrama fasorial de la figura 16-6.

► FIGURA 16–6



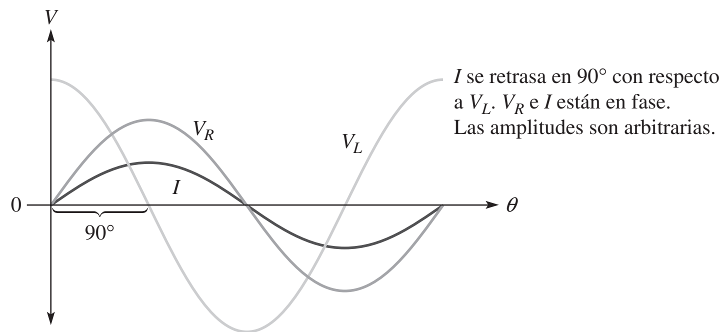
Problema relacionado Si el voltaje de la fuente mostrado en la figura 16-5 fuera de 5 ∠ 0° V, ¿cuál sería la corriente expresada en forma polar?



Use el archivo Multisim E16-02 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Relaciones de fase de corriente y voltajes

En un circuito *RL* dispuesto en serie, la corriente es la misma a través del resistor y del inductor. Por tanto, el voltaje del resistor está en fase con la corriente, y el voltaje del inductor aparece 90° por delante de la corriente. Así, existe una diferencia de fase de 90° entre el voltaje del resistor, V_R, y el voltaje del inductor, V_L, como se muestra en el diagrama de forma de onda de la figura 16-7.



◀ **FIGURA 16–7**

Relación de fase de voltajes y corriente en un circuito *RL* en serie.

Según la ley del voltaje de Kirchhoff, la suma de caídas de voltaje debe ser igual al voltaje aplicado, puesto que V_R y V_L no están en fase entre sí, deben ser sumados como cantidades fasoriales con V_L adelantado en 90° con respecto a V_R, como indica la figura 16-8(a). Según muestra la parte (b), V_s es la suma fasorial de V_R y V_L.

$$\mathbf{V}_s = V_R + jV_L$$ **Ecuación 16–3**

Esta ecuación se expresa en forma polar como

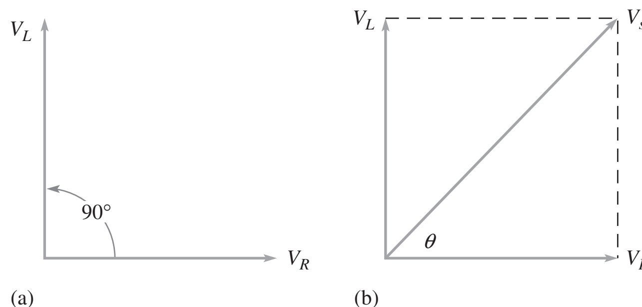
$$\mathbf{V}_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right)$$ **Ecuación 16–4**

donde la magnitud del voltaje de fuente es

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$

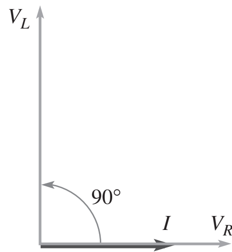
y el ángulo de fase entre el voltaje del resistor y el voltaje de fuente es

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right)$$



◀ **FIGURA 16–8**

Diagrama fasorial de voltaje para un circuito *RL* en serie.



▲ **FIGURA 16–9**

Diagrama fasorial de voltaje y corriente para las formas de onda de la figura 16-7.

Como el voltaje del resistor y la corriente están en fase, θ es también el ángulo de fase entre el voltaje de fuente y la corriente. La figura 16-9 muestra un diagrama fasorial de voltaje y corriente que representa el diagrama de la forma de onda de la figura 16-7.

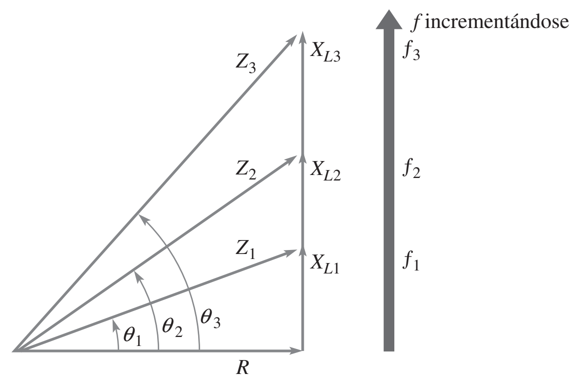
Variación de la impedancia y del ángulo de fase con la frecuencia

El triángulo de impedancia es útil para visualizar de qué modo la frecuencia del voltaje aplicado afecta la respuesta del circuito *RL*. Como se sabe, la reactancia inductiva varía directamente con la frecuencia. Cuando X_L se incrementa, la magnitud de la impedancia total también se incrementa; y cuando X_L disminuye, la magnitud total de la impedancia total disminuye. Por tanto, Z depende directamente de la frecuencia. El ángulo de fase θ varía también directamente con la frecuencia, porque $\theta = \tan^{-1}(X_L/R)$. Conforme X_L se incrementa con la frecuencia, también lo hace θ, y viceversa.

En la figura 16-10 se utiliza el triángulo de impedancia para ilustrar las variaciones de X_L, Z y θ conforme cambia la frecuencia. Naturalmente, R permanece constante. El punto principal es que debido a que X_L varía directamente con la frecuencia, también lo hacen la magnitud de la impedancia total y el ángulo de fase. El ejemplo 16-3 ilustra esto.

▶ **FIGURA 16–10**

Conforme se incrementa la frecuencia, también aumentan X_L, Z y θ. Cada valor de frecuencia puede ser visualizado como parte de un triángulo de impedancia diferente.

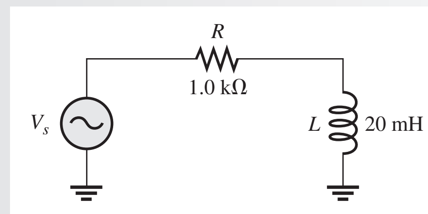


EJEMPLO 16–3

Para el circuito *RL* en serie que muestra la figura 16-11, determine la magnitud de la impedancia total y el ángulo de fase para cada una de las siguientes frecuencias:

(a) 10 kHz **(b)** 20 kHz **(c)** 30 kHz

▶ **FIGURA 16–11**



Solución **(a)** Para $f = 10$ kHz,

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10\text{ kHz})(20\text{ mH}) = 1.26\text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (1.26\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.26\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 1.61\angle 51.6^\circ\text{ k}\Omega$$

Por tanto, $Z =$ **1.61 kΩ** y $\theta =$ **51.6°.**

(b) Para $f = 20$ kHz,

$$X_L = 2\pi(20\text{ kHz})(20\text{ mH}) = 2.51\text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (2.51\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2.51\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 2.70\angle 68.3^\circ\text{ k}\Omega$$

Por tanto, $Z =$ **2.70 kΩ** y $\theta =$ **68.3°**

(c) Para $f = 30$ kHz,

$$X_L = 2\pi(30\text{ kHz})(20\text{ mH}) = 3.77\text{ k}\Omega$$

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (3.77\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{3.77\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{3.90\angle 75.1^\circ\text{ k}\Omega}$$

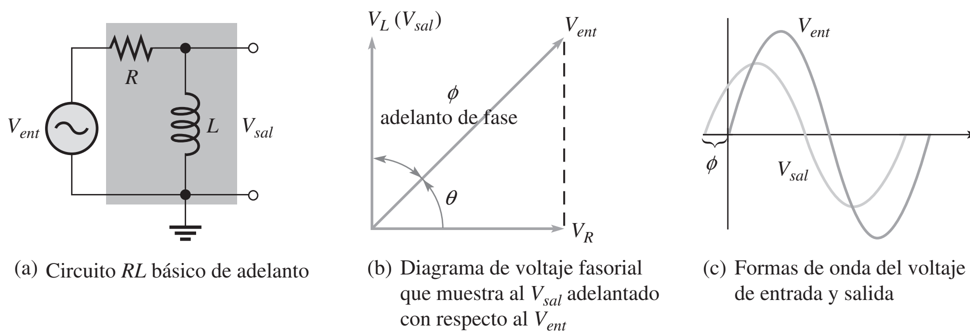
Por tanto, $Z =$ **3.90 kΩ** y $\theta =$ **75.1°.**

Note que conforme se incrementa la frecuencia, X_L, Z y θ a su vez también aumentan.

Problema relacionado Para la figura 16-11, determine Z y θ si f es de 100 kHz.

El circuito *RL* de adelanto

Un circuito *RL* de adelanto es un circuito de desplazamiento de fase en el cual el voltaje de salida aparece adelantado con respecto al voltaje de entrada en una cantidad especificada. La figura 16-12(a) muestra un circuito *RL* en serie con el voltaje de salida tomado entre los extremos del inductor. Observe que en el circuito *RC* de adelanto, la salida se tomó entre los extremos del resistor. El voltaje de fuente es la entrada, V_{ent}. Como se sabe, θ es el ángulo entre la corriente y el voltaje de entrada; también es el ángulo entre el voltaje del resistor y el voltaje de entrada porque V_R e I están en fase.



(a) Circuito *RL* básico de adelanto

(b) Diagrama de voltaje fasorial que muestra al V_{sal} adelantado con respecto al V_{ent}

(c) Formas de onda del voltaje de entrada y salida

◀ **FIGURA 16–12**

Circuito *RL* de adelanto ($V_{sal} = V_L$).

Como V_L se adelanta en 90° a V_R, el ángulo de fase entre el voltaje del inductor y el voltaje de entrada es la diferencia entre 90° y θ, como se muestra en la figura 16-12(b). El voltaje del inductor es la salida; este voltaje adelanta a la entrada, por lo que se crea un circuito de adelanto básico.

Las formas de onda de entrada y salida del circuito de carga se muestran en la figura 16-12(c). La cantidad de diferencia de fase, designada mediante ϕ, entre la entrada y la salida depende de los valores relativos de la reactancia inductiva y la resistencia, al igual que la magnitud del voltaje de salida.

Diferencia de fase entre entrada y salida El ángulo entre V_{sal} y V_{ent} se designa mediante ϕ (fi) y se desarrolla como sigue. Las expresiones polares para el voltaje de entrada y la corriente son $V_{ent}\angle 0^\circ$ e $I\angle -\theta$, respectivamente. El voltaje de salida en forma polar es

$$\mathbf{V}_{sal} = (I\angle -\theta)(X_L\angle 90^\circ) = IX_L\angle(90^\circ - \theta)$$

Esta expresión muestra que el voltaje de salida forma un ángulo de $90° - \theta$ con respecto al voltaje de entrada. Como $\theta = \tan^{-1}(X_L/R)$, el ángulo ϕ entre la entrada y la salida es

$$\phi = 90° - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

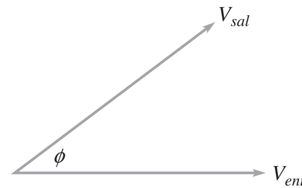
De manera equivalente, este ángulo se expresa como

Ecuación 16–5

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$$

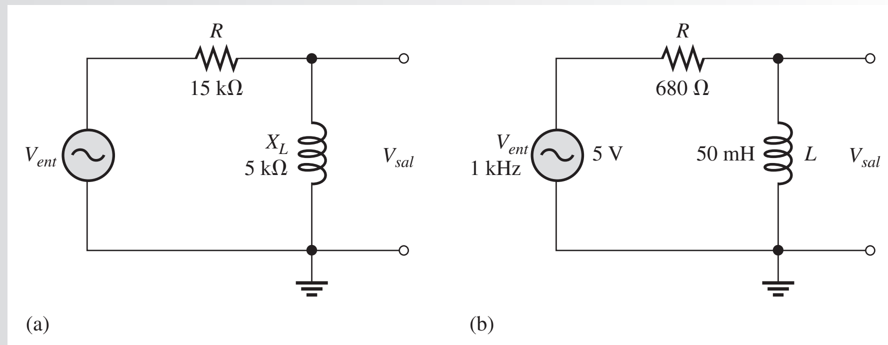
El ángulo ϕ entre la salida y la entrada siempre es positivo, lo cual indica que el voltaje de salida está adelantado con respecto al voltaje de entrada, como ilustra la figura 16-13.

▶ FIGURA 16–13



EJEMPLO 16–4 Determine la cantidad de adelanto de fase de la entrada a la salida en cada circuito de adelanto mostrado en la figura 16-14.

▶ FIGURA 16–14



Solución Para el circuito de adelanto de la figura 16-14(a),

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{15\text{ k}\Omega}{5\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{71.6°}$$

La salida adelanta en 71.6° a la entrada.

Para el circuito de adelanto de la figura 16-14(b), determine primero la reactancia inductiva.

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\text{ kHz})(50\text{ mH}) = 314\ \Omega$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{680\ \Omega}{314\ \Omega}\right) = \mathbf{65.2°}$$

La salida adelanta en 65.2° a la entrada.

Problema relacionado En un circuito de adelanto, $R = 2.2\text{ k}\Omega$ y $X_L = 1\text{ k}\Omega$. ¿Cuál es el adelanto de fase?



Use los archivos Multisim E16-04A y E16-04B para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Magnitud del voltaje de salida Para evaluar el voltaje de salida en función de su magnitud, visualicemos el circuito *RL* de adelanto como un divisor de voltaje. Una parte del voltaje total de entrada decae entre los extremos del resistor y una parte entre los extremos del inductor. Como el voltaje de salida es el voltaje entre los extremos del inductor, se puede calcular aplicando la ley de Ohm ($V_{sal} = IX_L$) o la fórmula del divisor de voltaje.

$$V_{sal} = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{ent}$$

Ecuación 16–6

La expresión fasorial para el voltaje de salida de un circuito *RL* de adelanto es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi$$

EJEMPLO 16–5 Para el circuito de adelanto de la figura 16-14(b) (ejemplo 16-4), determine el voltaje de salida en forma fasorial cuando el voltaje de entrada tiene un valor rms de 5 V. Trace las formas de onda del voltaje de entrada y salida que muestren sus valores pico. La reactancia inductiva X_L (314 Ω) y ϕ (65.2°) se determinaron en el ejemplo 16-4.

Solución El voltaje de salida en forma fasorial es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{ent}\angle\phi$$

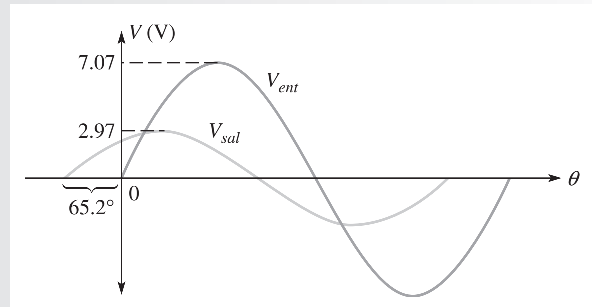
$$= \left(\frac{314\ \Omega}{\sqrt{(680\ \Omega)^2 + (314\ \Omega)^2}}\right)5\angle 65.2^\circ\ \text{V} = \mathbf{2.10\angle 65.2^\circ\ V}$$

Los valores pico de voltaje son

$$V_{ent(p)} = 1.414V_{ent(rms)} = 1.414(5\ \text{V}) = 7.07\ \text{V}$$
$$V_{sal(p)} = 1.414V_{sal(rms)} = 1.414(2.10\ \text{V}) = 2.97\ \text{V}$$

En la figura 16-15 se muestran las formas de onda con sus valores pico. Observe que el voltaje de salida aparece adelantado en 65.2° al voltaje de entrada.

▶ **FIGURA 16–15**



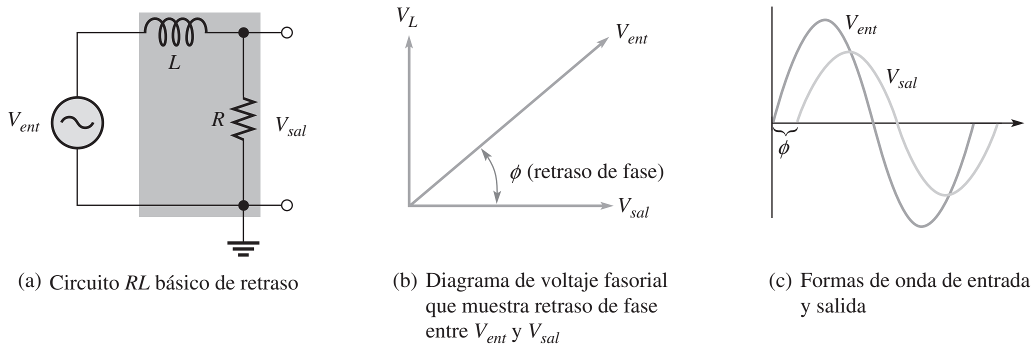
Problema relacionado En un circuito de adelanto, ¿se incrementa o disminuye el voltaje de salida cuando se incrementa la frecuencia?



Use el archivo Multisim E16-05 para comprobar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

El circuito *RL* de retraso

El circuito *RL* de retraso es un circuito de desplazamiento de fase en el cual el voltaje de salida se retrasa con respecto al voltaje de entrada en una cantidad especificada. Cuando la salida de un circuito *RL* en serie se toma entre los extremos del resistor en lugar de entre los extremos del inductor, como ilustra la figura 16-16(a), se convierte en un circuito de retraso.



(a) Circuito *RL* básico de retraso

(b) Diagrama de voltaje fasorial que muestra retraso de fase entre V_{ent} y V_{sal}

(c) Formas de onda de entrada y salida

▲ **FIGURA 16–16**

Circuito *RL* de retraso ($V_{sal} = V_R$).

Diferencia de fase entre entrada y salida En un circuito *RL* dispuesto en serie, la corriente se retrasa con respecto al voltaje de entrada. Como el voltaje de salida se toma entre los extremos del resistor, la salida se retrasa con respecto a la entrada, tal como indica el diagrama fasorial de la figura 16-16(b). Las formas de onda se muestran en la figura 16-16(c).

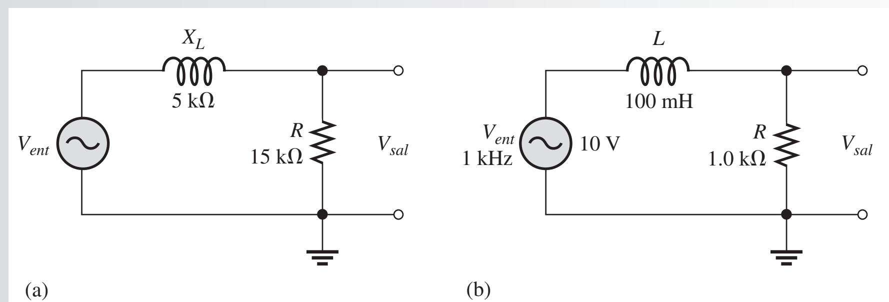
Igual que en el circuito de adelanto, la cantidad de diferencia de fase entre la entrada y la salida y la magnitud del voltaje de salida en el circuito de retraso dependen de los valores relativos de la resistencia y la reactancia inductiva. Cuando al voltaje de entrada se le asigna un ángulo de referencia de 0°, el ángulo del voltaje de salida (ϕ) con respecto al voltaje de entrada es igual a θ porque el voltaje entre los extremos del resistor (salida) y la corriente están en fase entre sí. La expresión para el ángulo entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida es

Ecuación 16–7

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

El ángulo es negativo porque la salida aparece retrasada con respecto a la entrada.

EJEMPLO 16–6 Calcule el ángulo de fase de salida para los circuitos mostrados en la figura 16-17.



▲ **FIGURA 16–17**

Solución Para el circuito de la figura 16-17(a).

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{5\text{ k}\Omega}{15\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{-18.4°}$$

La salida se retrasa en 18.4° con respecto a la entrada.

Para el circuito de la figura 16-17(b), determine primero la reactancia inductiva.

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 628\ \Omega$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{628\ \Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{-32.1^\circ}$$

La salida se retrasa en 32.1° con respecto a la entrada.

Problema relacionado En cierto circuito de retraso, $R = 5.6\text{ k}\Omega$ y $X_L = 3.5\text{ k}\Omega$. Determine el ángulo de fase.



Use los archivos Multisim E16-06A y E16-06B para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Magnitud del voltaje de salida Como el voltaje de salida de un circuito *RL* de retraso se toma entre los extremos del resistor, la magnitud se calcula o mediante la ley de Ohm ($V_{sal} = IR$) o con la fórmula del divisor de voltaje.

$$V_{sal} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{ent}$$

Ecuación 16–8

La expresión para el voltaje de salida en forma fasorial es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi$$

EJEMPLO 16–7 En la figura 16-17(b) (ejemplo 16-6), el voltaje de entrada tiene un valor rms de 10 V. Determine la expresión fasorial para el voltaje de salida. Trace las relaciones de forma de onda para los voltajes de entrada y salida. El ángulo de fase (−32.1°) y X_L (628 Ω) se calcularon en el ejemplo 16-6.

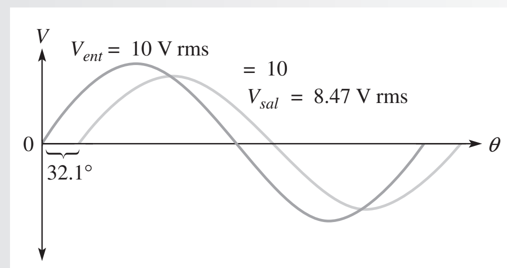
Solución La expresión fasorial para el voltaje de salida es

$$\mathbf{V}_{sal} = V_{sal}\angle\phi = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{ent}\angle\phi$$

$$= \left(\frac{1.0\text{ k}\Omega}{1181\ \Omega}\right)10\angle -32.1^\circ\text{ V} = \mathbf{8.47\angle -32.1^\circ\ V\ rms}$$

Las formas de onda se muestran en la figura 16-18.

▶ **FIGURA 16–18**



Problema relacionado En un circuito de retraso, $R = 4.7\text{ k}\Omega$ y $X_L = 6\text{ k}\Omega$. Si el voltaje rms de entrada es de 20 V, ¿cuál es el voltaje de salida?



Use el archivo Multisim E16-07 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 16-3

1. En cierto circuito *RL* en serie, $V_R = 2$ V y $V_L = 3$ V. ¿Cuál es la magnitud del voltaje de fuente?
2. En la pregunta 1, ¿cuál es el ángulo de fase entre el voltaje de fuente y la corriente?
3. Cuando la frecuencia del voltaje aplicado en un circuito *RL* en serie se incrementa, ¿qué le sucede a la reactancia inductiva? ¿Qué le sucede a la magnitud de la impedancia total? ¿Qué le pasa al ángulo de fase?
4. Cierto circuito *RL* de adelanto se compone de un resistor de 3.3 kΩ y un inductor de 15 mH. Determine el desplazamiento de fase entre la entrada y la salida a una frecuencia de 5 kHz.
5. Un circuito *RL* de retraso tiene los mismos valores de componentes que el circuito de adelanto de la pregunta 4. ¿Cuál es la magnitud del voltaje de salida a 5 kHz cuando la entrada es de 10 V rms?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de circuitos reactivos dispuestos en serie continúa en el capítulo 17, parte 1, en la página 727.

CIRCUITOS EN PARALELO

Parte **2**

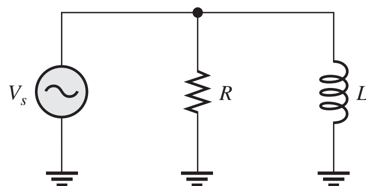
16–4 IMPEDANCIA Y ADMITANCIA DE CIRCUITOS *RL* EN PARALELO

En esta sección, usted aprenderá cómo determinar la impedancia y el ángulo de fase de un circuito *RL* en paralelo. La impedancia consta de magnitud y ángulo de fase. Además, se introducen la susceptancia inductiva y la admitancia de un circuito *RL* dispuesto en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar impedancia y admitancia en un circuito *RL* en paralelo**
    - Expresar la impedancia total en forma compleja
    - Definir y calcular la *susceptancia inductiva* y la *admitancia*

La figura 16-19 muestra un circuito *RL* básico conectado a una fuente de voltaje de ca.



▲ **FIGURA 16–19**

Circuito *RL* en paralelo.

La expresión para la impedancia total de un circuito *RL* en paralelo de dos componentes se desarrolla como sigue, aplicando la regla del producto sobre la suma.

$$\mathbf{Z} = \frac{(R\angle 0^\circ)(X_L\angle 90^\circ)}{R + jX_L} = \frac{RX_L\angle(0^\circ + 90^\circ)}{\sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)}$$

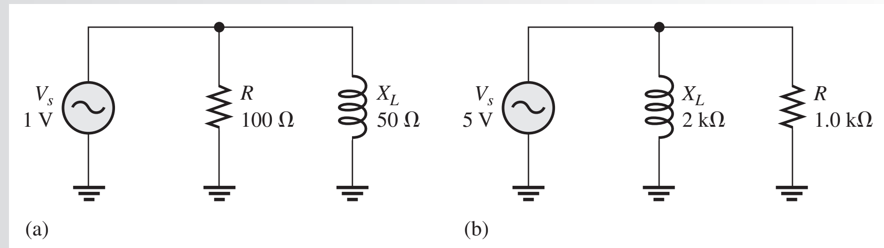
$$= \left(\frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)\angle\left(90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)\right)$$

De manera equivalente, esta ecuación se expresa como

$$\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$$

Ecuación 16–9

EJEMPLO 16–8 Para cada circuito de la figura 16-20, determine la magnitud y el ángulo de fase de la impedancia total.



▲ **FIGURA 16–20**

Solución Para el circuito de la figura 16-20(a), la impedancia total es

$$\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$$

$$= \left(\frac{(100\ \Omega)(50\ \Omega)}{\sqrt{(100\ \Omega)^2 + (50\ \Omega)^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{50\ \Omega}\right) = \mathbf{44.7\angle 63.4^\circ\ \Omega}$$

Por tanto, $Z = 44.7\ \Omega$ y $\theta = 63.4°$.

Para el circuito de la figura 16-20(b), la impedancia total es

$$\mathbf{Z} = \left(\frac{(1.0\ \text{k}\Omega)(2\ \text{k}\Omega)}{\sqrt{(1.0\ \text{k}\Omega)^2 + (2\ \text{k}\Omega)^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.0\ \text{k}\Omega}{2\ \text{k}\Omega}\right) = \mathbf{894\angle 26.6^\circ\ \Omega}$$

Por tanto, $Z = 894\ \Omega$ y $\theta = 26.6°$.

Obsérvese que el ángulo positivo indica que el voltaje se adelanta a la corriente, en oposición al caso *RC* donde el voltaje se retrasa con respecto a la corriente.

Problema relacionado En un circuito en paralelo, $R = 10\ \text{k}\Omega$ y $X_L = 14\ \text{k}\Omega$. Determine la impedancia total en forma polar.

Conductancia, susceptancia y admitancia

Como ya se sabe por el capítulo previo, la conductancia (G) es el recíproco de la resistencia, la susceptancia (B) es el recíproco de la reactancia, y la admitancia (Y) es el recíproco de la impedancia.

En circuitos *RL* dispuestos en paralelo, la expresión fasorial para **susceptancia inductiva (B_L)** es

$$\mathbf{B}_L = \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} = B_L\angle -90^\circ = -jB_L$$

y la expresión fasorial para **admitancia** es

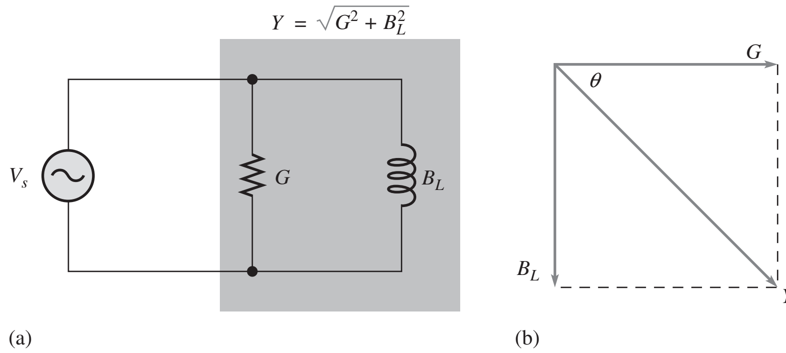
$$\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle\pm\theta} = Y\angle\mp\theta$$

En el circuito *RL* básico en paralelo que muestra la figura 16-21, la admitancia total es la suma fasorial de la conductancia y la susceptancia inductiva.

Ecuación 16–10

$$\mathbf{Y} = G - jB_L$$

Tal como para el circuito *RC*, la unidad de conductancia (G), susceptancia inductiva (B_L), y admitancia (Y) es el siemens (S).

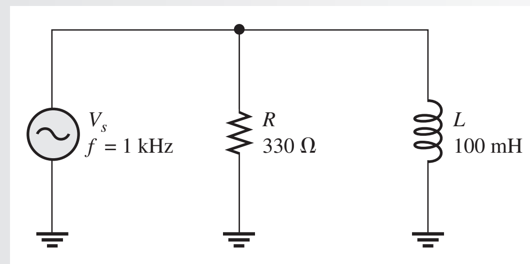


▲ **FIGURA 16–21**

Admitancia en un circuito *RL* en paralelo.

EJEMPLO 16–9 Determine la admitancia total y luego conviértala en impedancia total en la figura 16-22. Trace el diagrama fasorial de admitancia.

▶ **FIGURA 16–22**



Solución Primero, determine la magnitud de la conductancia. $R = 330\ \Omega$; por tanto,

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{330\ \Omega} = 3.03\ \text{mS}$$

En seguida, determine la reactancia inductiva.

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1000\ \text{Hz})(100\ \text{mH}) = 628\ \Omega$$

La magnitud de la susceptancia inductiva es

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{628\ \Omega} = 1.59\ \text{mS}$$

La admitancia total es

$$\mathbf{Y}_{tot} = G - jB_L = 3.03\ \text{mS} - j1.59\ \text{mS}$$

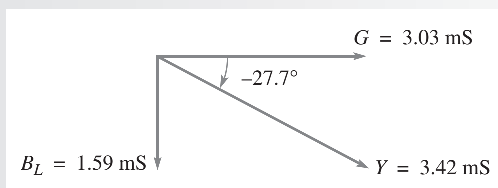
la cual puede ser expresada en forma polar como

$$\mathbf{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{B_L}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(3.03\ \text{mS})^2 + (1.59\ \text{mS})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{1.59\ \text{mS}}{3.03\ \text{mS}}\right) = \mathbf{3.42\angle -27.7^\circ\ mS}$$

El diagrama fasorial de la admitancia se muestra en la figura 16-23.

▶ FIGURA 16–23



Convierta la admitancia total en impedancia total como sigue:

$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{tot}} = \frac{1}{3.42\angle -27.7^\circ \text{ mS}} = \mathbf{292\angle 27.7^\circ\ \Omega}$$

El ángulo de fase positivo indica que el voltaje se adelanta a la corriente.

Problema relacionado ¿Cuál será la admitancia total del circuito de la figura 16-22 si f se incrementa a 2 kHz?

REPASO DE LA SECCIÓN 16-4

1. Si $Z = 500\ \Omega$, ¿cuál es el valor de la magnitud de la admitancia Y?
2. En cierto circuito *RL* en paralelo, $R = 47\ \Omega$ y $XL = 75\ \Omega$. Determine Y.
3. En el circuito de la pregunta 2, ¿la corriente total se adelanta o retrasa con respecto al voltaje aplicado? ¿En qué ángulo de fase?

16–5 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RL* EN PARALELO

La ley de Ohm y la ley de la corriente de Kirchhoff son utilizadas en el análisis de circuitos *RL*. Se examinan las relaciones de corriente y voltaje en un circuito *RL* en paralelo.

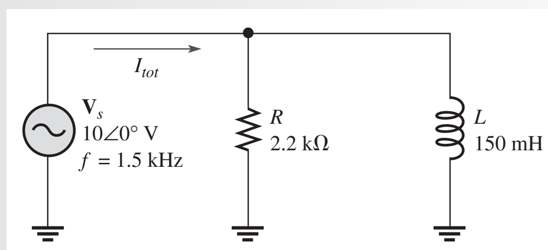
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un circuito *RL* en paralelo**
  - Aplicar la ley de Ohm y la ley de las corrientes de Kirchhoff a circuitos *RL* en paralelo
  - Expresar voltajes y corrientes como cantidades fasoriales

El siguiente ejemplo aplica la ley de Ohm al análisis de un circuito *RL* dispuesto en paralelo.

EJEMPLO 16–10 Determine la corriente total y el ángulo de fase en el circuito de la figura 16-24. Trace un diagrama fasorial que muestre las relaciones de $\mathbf{V}_s$ y $\mathbf{I}_{tot}$.

▶ FIGURA 16–24



Solución La reactancia inductiva es

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1.5\text{ kHz})(150\text{ mH}) = 1.41\text{ k}\Omega$$

La magnitud de la susceptancia inductiva es

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{1.41\text{ k}\Omega} = 709\ \mu\text{S}$$

La magnitud de la conductancia es

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2.2\text{ k}\Omega} = 455\ \mu\text{S}$$

La admitancia total es

$$\mathbf{Y}_{tot} = G - jB_L = 455\ \mu\text{S} - j709\ \mu\text{S}$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Y}_{tot} = \sqrt{G^2 + B_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{B_L}{G}\right)$$

$$= \sqrt{(455\ \mu\text{S})^2 + (709\ \mu\text{S})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{709\ \mu\text{S}}{455\ \mu\text{S}}\right) = 842\angle -57.3°\ \mu\text{S}$$

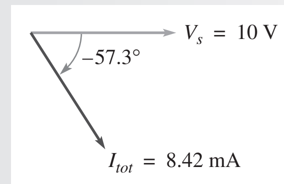
El ángulo de fase es de –57.3°.

Use la ley de Ohm para determinar la corriente total.

$$\mathbf{I}_{tot} = \mathbf{V}_s\mathbf{Y}_{tot} = (10\angle 0°\text{ V})(842\angle -57.3°\ \mu\text{S}) = \mathbf{8.42\angle -57.3°\ mA}$$

La magnitud de la corriente total es de 8.42 mA, y se retrasa en **57.3**° con respecto al voltaje aplicado, tal como lo indica el ángulo negativo asociado con él. El diagrama fasorial que aparece en la figura 16-25 muestra estas relaciones.

▶ **FIGURA 16–25**



Problema relacionado Determine la corriente en forma polar si *f* se reduce a 800 Hz en la figura 16-24.



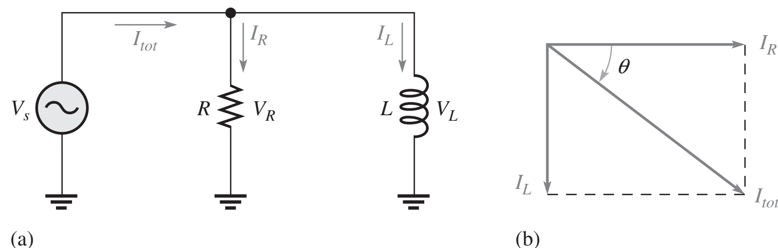
Use el archivo Multisim E16-10 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Relaciones de fase de corrientes y voltajes

La figura 16-26(a) muestra todas las corrientes que circulan en un circuito *RL* básico dispuesto en paralelo. En la unión, la corriente total, I_{tot}, se divide en las dos corrientes de rama, I_R e I_L. El voltaje aplicado, V_s, aparece tanto entre las terminales de las ramas resistivas como en las inductivas, por tanto V_s, V_R y V_L están en fase y su magnitud es igual.

La corriente a través del resistor está en fase con el voltaje. La corriente a través del inductor se retrasa en 90° con respecto al voltaje y a la corriente del resistor. De acuerdo con la ley de la corriente de Kirchhoff, la corriente total es la suma fasorial de las dos corrientes de rama, según muestra el diagrama fasorial de la figura 16-26(b). La corriente total se expresa como

$$\mathbf{I}_{tot} = I_R - jI_L \qquad \textbf{Ecuación 16–11}$$



▲ **FIGURA 16–26**

Corrientes en un circuito *RL* en paralelo. Las direcciones de corriente mostradas en la parte (a) son instantáneas y, desde luego, se invierten cuando el voltaje de fuente se invierte durante cada ciclo.

Esta ecuación se expresa en forma polar como

Ecuación 16–12

$$\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$$

donde la magnitud de la corriente total es

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

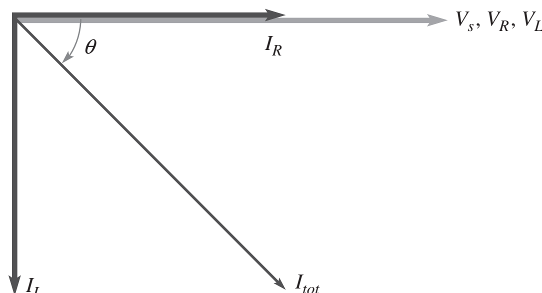
y el ángulo de fase entre la corriente del resistor y la corriente total es

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$$

Como la corriente a través del resistor y el voltaje aplicado están en fase, también θ representa el ángulo de fase entre la corriente total y el voltaje aplicado. La figura 16-27 muestra un diagrama fasorial completo de corriente y voltaje.

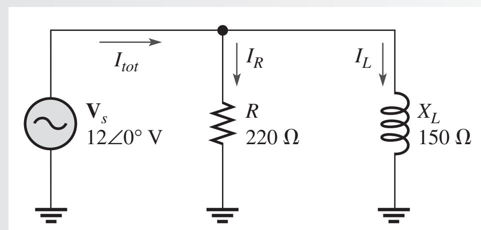
▶ **FIGURA 16–27**

Diagrama fasorial de corriente y voltaje para un circuito *RL* en paralelo (las amplitudes son arbitrarias).



EJEMPLO 16–11 Determine el valor de cada corriente en la figura 16-28, y describa la relación de fase de cada corriente con el voltaje aplicado. Trace el diagrama fasorial de la corriente.

▶ **FIGURA 16–28**



Solución La corriente a través del resistor, la corriente a través del inductor, y la corriente total se expresan como sigue:

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{R}} = \frac{12\angle 0^\circ \text{ V}}{220\angle 0^\circ\ \Omega} = \mathbf{54.5\angle 0^\circ\ mA}$$

$$\mathbf{I}_L = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{X}_L} = \frac{12\angle 0^\circ \text{ V}}{150\angle 90^\circ\ \Omega} = \mathbf{80\angle -90^\circ\ mA}$$

$$\mathbf{I}_{tot} = I_R - jI_L = 54.5 \text{ mA} - j80 \text{ mA}$$

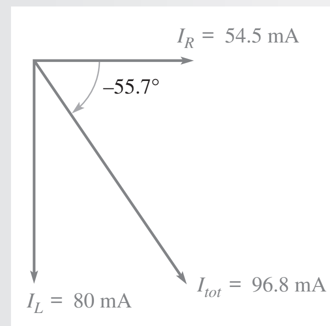
Al convertir $\mathbf{I}_{tot}$ a forma polar se obtiene

$$\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$$

$$= \sqrt{(54.5 \text{ mA})^2 + (80 \text{ mA})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{80 \text{ mA}}{54.5 \text{ mA}}\right) = \mathbf{96.8\angle -55.7^\circ\ mA}$$

Tal como indican los resultados, la corriente a través del resistor es de 54.5 mA y está en fase con el voltaje aplicado. La corriente a través del inductor es de 80 mA y se retrasa en 90° con respecto al voltaje aplicado. La corriente total es de 96.8 mA y se retrasa en 55.7° con respecto al voltaje. El diagrama fasorial que aparece en la figura 16-29 muestra estas relaciones.

▶ **FIGURA 16–29**



Problema relacionado Encuentre la magnitud de I_{tot} y el ángulo de fase del circuito si $X_L = 300\ \Omega$ en la figura 16-28.

REPASO DE LA SECCIÓN 16-5

1. La admitancia de un circuito *RL* es de 4 mS, y el voltaje aplicado de 8 V. ¿Cuál es la corriente total?
2. En cierto circuito *RL* en paralelo, la corriente a través del resistor es de 12 mA y la corriente a través del inductor es de 20 mA. Determine la magnitud y el ángulo de fase de la corriente total. ¿Con respecto a qué se mide este ángulo de fase?
3. ¿Cuál es el ángulo de fase entre la corriente a través del inductor y el voltaje aplicado en un circuito *RL* en paralelo?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de circuitos reactivos en serie continúa en el capítulo 17, parte 2, en la página 740.

Parte 3

CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

16–6 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RL* EN SERIE-PARALELO

Los conceptos estudiados con respecto a circuitos en serie y en paralelo se utilizan para analizar circuitos que tienen combinaciones de componentes *R* y *L* tanto en serie como en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

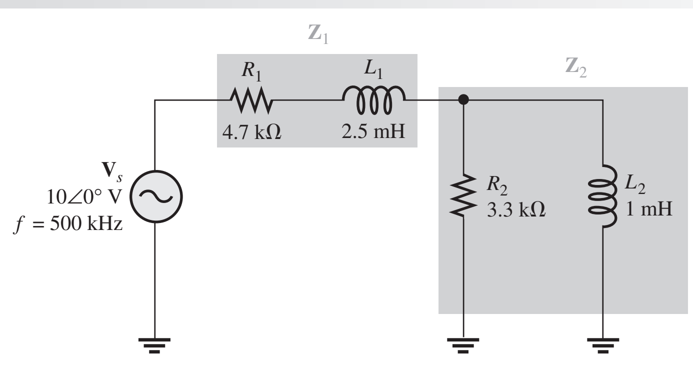
- **Analizar circuitos *RL* en serie-paralelo**
  - Determinar la impedancia total
  - Calcular corrientes y voltajes

De la sección 15-1, recordemos que la impedancia de componentes en serie se expresa con más facilidad en forma rectangular, y que la impedancia de componentes en paralelo es más fácil de calcular utilizando la forma polar. Los pasos para analizar un circuito que tenga componentes en serie y en paralelo se ilustran en el ejemplo 16-12. Primero se expresa la impedancia de la parte dispuesta en serie del circuito en forma rectangular y la impedancia de la parte en paralelo en forma polar. A continuación, se convierte la impedancia de la parte en paralelo a forma rectangular y se le suma a la impedancia de la parte en serie. Una vez que se determina la forma rectangular de la impedancia total, se puede convertir a forma polar para ver la magnitud y el ángulo de fase y calcular la corriente.

EJEMPLO 16–12 En el circuito de la figura 16-30, determine los siguientes valores:

(a) $\mathbf{Z}_{tot}$ **(b)** $\mathbf{I}_{tot}$ **(c)** θ

▶ FIGURA 16–30



Solución **(a)** Primero, encuentre las magnitudes de la reactancia inductiva.

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 = 2\pi(500\text{ kHz})(2.5\text{ mH}) = 7.85\text{ k}\Omega$$
$$X_{L2} = 2\pi f L_2 = 2\pi(500\text{ kHz})(1\text{mH}) = 3.14\text{ k}\Omega$$

Un método es encontrar la impedancia de la parte en serie y la impedancia de la parte en paralelo y combinarlas para obtener la impedancia total. La impedancia de la combinación en serie de R_1 y L_1 es

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 + jX_{L1} = 4.7\text{ k}\Omega + j7.85\text{ k}\Omega$$

Para determinar la impedancia de la parte en paralelo, primero se determina la admitancia de la combinación en paralelo de R_2 y L_2.

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{3.3\text{ k}\Omega} = 303\ \mu\text{S}$$

$$B_{L2} = \frac{1}{X_{L2}} = \frac{1}{3.14\text{ k}\Omega} = 318\ \mu\text{S}$$

$$\mathbf{Y}_2 = G_2 - jB_L = 303\ \mu\text{S} - j318\ \mu\text{S}$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Y}_2 = \sqrt{G_2^2 + B_{L2}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{B_{L2}}{G_2}\right)$$

$$= \sqrt{(303\ \mu\text{S})^2 + (318\ \mu\text{S})^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{318\ \mu\text{S}}{303\ \mu\text{S}}\right) = 439\angle -46.4^\circ\ \mu\text{S}$$

Entonces, la impedancia de la parte en paralelo es

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{1}{\mathbf{Y}_2} = \frac{1}{439\angle -46.4^\circ\ \mu\text{S}} = 2.28\angle 46.4^\circ\text{ k}\Omega$$

Al convertir a forma rectangular se obtiene

$$\mathbf{Z}_2 = Z_2\cos\theta + jZ_2\text{sen}\,\theta$$

$$= (2.28\text{ k}\Omega)\cos(46.4^\circ) + j(2.28\text{ k}\Omega)\text{sen}(46.4^\circ) = 1.57\text{ k}\Omega + j1.65\text{ k}\Omega$$

La parte en serie y la parte en paralelo están en serie entre sí. Combine $\mathbf{Z}_1$ y $\mathbf{Z}_2$ para obtener la impedancia total.

$$\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$$

$$= (4.7\text{ k}\Omega + j7.85\text{ k}\Omega) + (1.57\text{ k}\Omega + j1.65\text{ k}\Omega) = 6.27\text{ k}\Omega + j9.50\text{ k}\Omega$$

Al expresar $\mathbf{Z}_{tot}$ en forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z}_{tot} = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)$$

$$= \sqrt{(6.27\text{ k}\Omega)^2 + (9.50\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{9.50\text{ k}\Omega}{6.27\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{11.4\angle 56.6^\circ\ k\Omega}$$

(b) Use la ley de Ohm para determinar la corriente total.

$$\mathbf{I}_{tot} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_{tot}} = \frac{10\angle 0^\circ\text{ V}}{11.4\angle 56.6^\circ\text{ k}\Omega} = \mathbf{877\angle -56.6^\circ\ \mu A}$$

(c) La corriente total se retrasa en **56.6**° con respecto al voltaje aplicado.

Problema relacionado

(a) Determine el voltaje entre las terminales de la parte en serie del circuito mostrado en la figura 16-30.

(b) Determine el voltaje entre las terminales de la parte en paralelo del circuito mostrado en la figura 16-30.

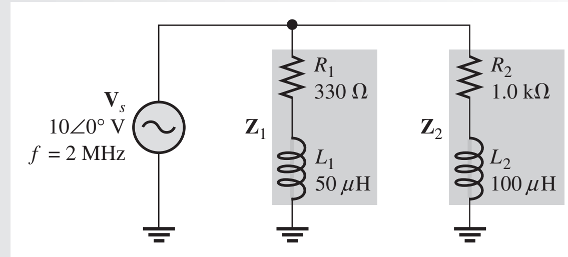


Use el archivo Multisim E16-12 para verificar los resultados calculados en la parte (b) de este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

El ejemplo 16-13 muestra dos conjuntos de componentes en paralelo. El método es expresar primero cada impedancia de rama en forma rectangular y convertir luego cada una de estas impedancias a forma polar. A continuación, se calcula cada corriente de rama mediante notación polar. Una vez que se conocen las corrientes de rama, es posible encontrar la corriente total sumando las dos corrientes de rama en forma rectangular. En este caso particular, no se requiere la impedancia total.

EJEMPLO 16–13 Determine el voltaje entre las terminales de cada componente mostrado en la figura 16-31. Trace un diagrama fasorial de voltaje y un diagrama fasorial de corriente.

▶ FIGURA 16–31



Solución Primero, calcule X_{L1} y X_{L2}.

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 = 2\pi(2\text{ MHz})(50\ \mu\text{H}) = 628\ \Omega$$
$$X_{L2} = 2\pi f L_2 = 2\pi(2\text{ MHz})(100\ \mu\text{H}) = 1.26\text{ k}\Omega$$

A continuación, determine la impedancia de cada rama.

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 + jX_{L1} = 330\ \Omega + j628\ \Omega$$
$$\mathbf{Z}_2 = R_2 + jX_{L2} = 1.0\text{ k}\Omega + j1.26\text{ k}\Omega$$

Convierta estas impedancias a forma polar.

$$\mathbf{Z}_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{L1}}{R_1}\right)$$
$$= \sqrt{(330\ \Omega)^2 + (628\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{628\ \Omega}{330\ \Omega}\right) = 709\angle 62.3^\circ\ \Omega$$
$$\mathbf{Z}_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{L2}}{R_2}\right)$$
$$= \sqrt{(1.0\text{ k}\Omega)^2 + (1.26\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.26\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 1.61\angle 51.6^\circ\text{ k}\Omega$$

Calcule cada corriente de rama.

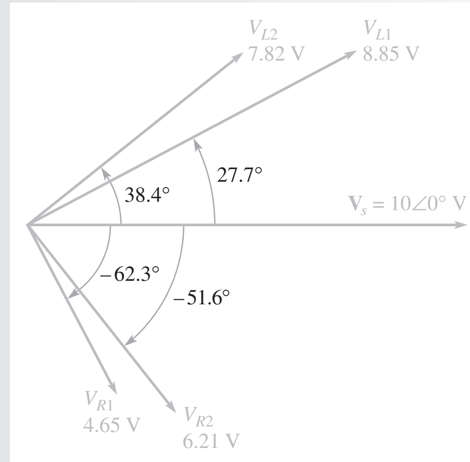
$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_1} = \frac{10\angle 0^\circ\text{ V}}{709\angle 62.3^\circ\ \Omega} = 14.1\angle -62.3^\circ\text{ mA}$$
$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}_2} = \frac{10\angle 0^\circ\text{ V}}{1.61\angle 51.6^\circ\text{ k}\Omega} = 6.21\angle -51.6^\circ\text{ mA}$$

Ahora, use la ley de Ohm para obtener el voltaje entre las terminales de cada elemento.

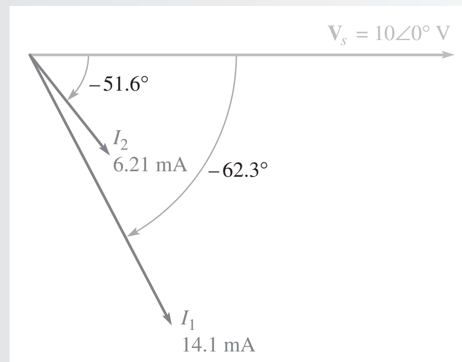
$$\mathbf{V}_{R1} = \mathbf{I}_1\mathbf{R}_1 = (14.1\angle -62.3^\circ\text{ mA})(330\angle 0^\circ\ \Omega) = \mathbf{4.65\angle -62.3^\circ\ V}$$
$$\mathbf{V}_{L1} = \mathbf{I}_1\mathbf{X}_{L1} = (14.1\angle -62.3^\circ\text{ mA})(628\angle 90^\circ\ \Omega) = \mathbf{8.85\angle 27.7^\circ\ V}$$
$$\mathbf{V}_{R2} = \mathbf{I}_1\mathbf{R}_2 = (6.21\angle -51.6^\circ\text{ mA})(1\angle 0^\circ\text{ k}\Omega) = \mathbf{6.21\angle -51.6^\circ\ V}$$
$$\mathbf{V}_{L2} = \mathbf{I}_2\mathbf{X}_{L2} = (6.21\angle -51.6^\circ\text{ mA})(1.26\angle 90^\circ\text{ k}\Omega) = \mathbf{7.82\angle 38.4^\circ\ V}$$

Los diagramas fasoriales de voltaje y corriente se muestran, respectivamente, en las figuras 16-32 y 16-33.

▶ FIGURA 16–32



▶ FIGURA 16–33



Problema relacionado ¿Cuál es la corriente total en forma polar en la figura 16-31?



Use el archivo Multisim E16-13 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 16-6

1. ¿Cuál es la impedancia total en forma polar del circuito de la figura 16-31?
2. Determine la corriente total en forma rectangular para el circuito de la figura 16-31.

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de circuitos reactivos en serie-paralelo continúa en el capítulo 17, parte 3, en la página 749.

Parte 4 TEMAS ESPECIALES

16–7 POTENCIA EN CIRCUITOS *RL*

En un circuito de ca puramente resistivo la resistencia disipa, en forma de calor, toda la energía suministrada por la fuente. En un circuito de ca puramente inductivo, el inductor guarda toda la energía suministrada por la fuente en su campo magnético durante una parte del ciclo de voltaje y luego la regresa a la fuente durante otra parte del ciclo de modo que no haya conversión de energía neta en calor. Cuando existe tanto resistencia como inductancia, una parte de la energía es guardada y regresada alternadamente por la inductancia y una parte es disipada por la resistencia. Los valores relativos de la resistencia y la reactancia inductiva determinan la cantidad de energía convertida en calor.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar potencia en circuitos *RL***
  - Explicar los conceptos de potencia real o activa y potencia reactiva
  - Trazar el triángulo de potencia
  - Explicar como se corrige el factor de potencia

Cuando en un circuito *RL* dispuesto en serie la resistencia es mayor que la reactancia inductiva, más de la energía total suministrada por la fuente es convertida en calor por la resistencia que la guardada por el inductor. Asimismo, cuando la reactancia es mayor que la resistencia, más de la energía total es guardada y regresada que la convertida en calor.

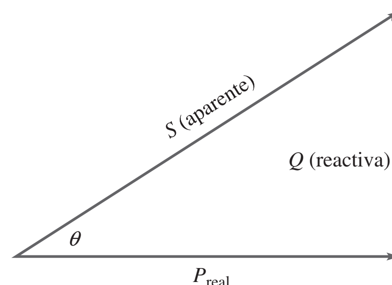
Como se sabe, la disipación de potencia en una resistencia es llamada *potencia real* o *activa*. La potencia presente en un inductor es potencia reactiva y se expresa como

Ecuación 16–13

$$P_r = I^2X_L$$

El triángulo de potencia para circuitos *RL*

El triángulo de potencia generalizado para un circuito *RL* dispuesto en serie se muestra en la figura 16-34. La **potencia aparente *S*,** es la resultante de la potencia promedio, *P*, y la potencia reactiva *Q*.



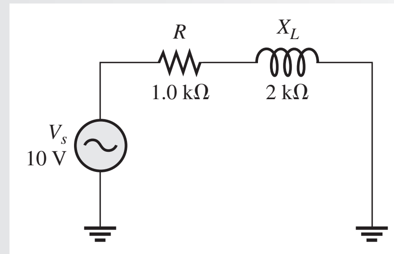
▶ **FIGURA 16–34**

Triángulo de potencia para un circuito *RL*.

Recuerde que el factor de potencia es igual al coseno de θ ($FP = \cos\theta$). Conforme el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total se incrementa, el factor de potencia disminuye, lo que indica un circuito crecientemente reactivo. Un factor de potencia menor indica menos potencia real y más potencia reactiva.

EJEMPLO 16–14 Determine el factor de potencia, la potencia real, la potencia reactiva, y la potencia aparente en el circuito de la figura 16-35.

▶ **FIGURA 16–35**



Solución La impedancia total en forma rectangular del circuito es

$$\mathbf{Z} = R + jX_L = 1.0\,\text{k}\Omega + j2\,\text{k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R_2^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(1.0\,\text{k}\Omega)^2 + (2\,\text{k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2\,\text{k}\Omega}{1.0\,\text{k}\Omega}\right) = 2.24\angle 63.4^\circ\,\text{k}\Omega$$

La magnitud de la corriente es

$$I = \frac{V_s}{Z} = \frac{10\,\text{V}}{2.24\,\text{k}\Omega} = 4.46\,\text{mA}$$

El ángulo de fase, indicado en la expresión para **Z**, es

$$\theta = 63.4^\circ$$

El factor de potencia es, por consiguiente;

$$FP = \cos\theta = \cos(63.4^\circ) = \mathbf{0.448}$$

La potencia real es

$$P = V_sI\cos\theta = (10\,\text{V})(4.46\,\text{mA})(0.448) = \mathbf{20\,mW}$$

La potencia reactiva es

$$Q = I^2X_L = (4.46\,\text{mA})^2(2\,\text{k}\Omega) = \mathbf{39.8\,mVAR}$$

La potencia aparente es

$$S = I^2Z = (4.46\,\text{mA})^2(2.24\,\text{k}\Omega) = \mathbf{44.6\,mVA}$$

Problema relacionado Si en la figura 16-35 se incrementa la frecuencia, ¿qué les sucede a *P, Q* y *S*?

Importancia del factor de potencia

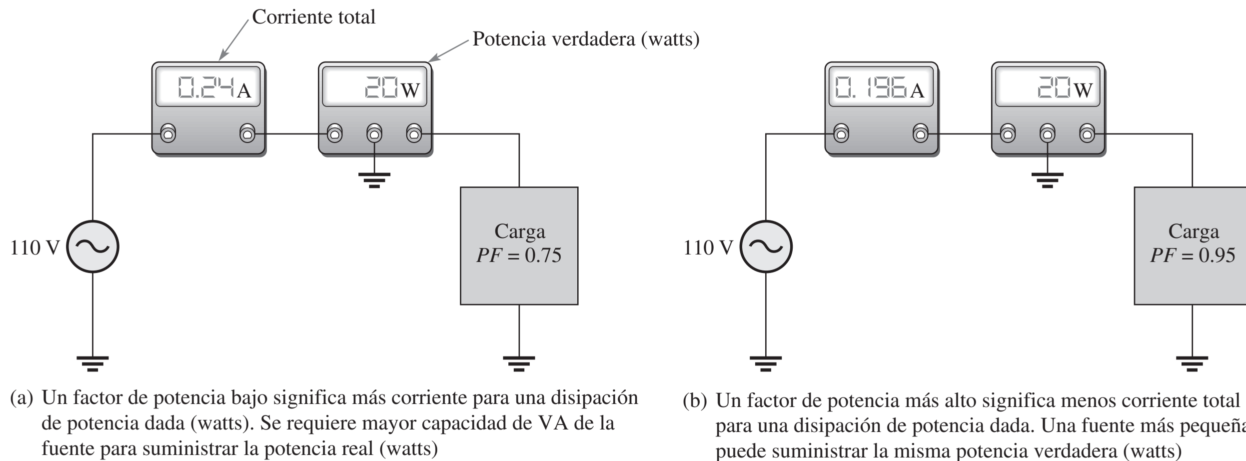
Tal como se aprendió en el capítulo 15, el **factor de potencia (*FP*)** es importante al determinar qué tanta potencia útil (potencia real) se transfiere a la carga. El factor de potencia más alto es de 1,

e indica que toda la corriente alimentada a una carga está en fase con el voltaje (resistivo). Cuando el factor de potencia es de 0, toda la corriente alimentada a una carga está desfasada en 90° con respecto al voltaje (reactivo).

En general, es deseable un factor de potencia lo más cercano posible a 1 porque, en ese caso, la mayor parte de la potencia transferida de la fuente a la carga es potencia útil o real. La potencia real fluye en un solo sentido —desde la fuente hasta la carga— y realiza trabajo en la carga en términos de disipación de energía. La potencia reactiva simplemente se mueve de un lado a otro entre la fuente y la carga sin realizar ningún trabajo. Se debe utilizar energía para que se realice trabajo.

Muchas cargas prácticas tienen inductancia a consecuencia de su función particular, y resulta esencial para su operación adecuada. Ejemplos de estas cargas son los transformadores, motores eléctricos y altavoces, por nombrar algunos. Por consiguiente, las cargas inductivas (y capacitivas) son consideraciones importantes.

Para ver el efecto del factor de potencia en los requerimientos del sistema, habrá que remitirse a la figura 16-36. Esta figura contiene la representación de una carga inductiva típica que consta efectivamente de inductancia y resistencia en paralelo. La parte (a) muestra una carga con un factor de potencia relativamente bajo (0.75), y la parte (b) muestra una carga con un factor de potencia relativamente alto (0.95). Ambas cargas disipan iguales cantidades de potencia como lo indican los wattímetros. Por tanto, en ambas cargas se realiza igual cantidad de trabajo.



(a) Un factor de potencia bajo significa más corriente para una disipación de potencia dada (watts). Se requiere mayor capacidad de VA de la fuente para suministrar la potencia real (watts)

(b) Un factor de potencia más alto significa menos corriente total para una disipación de potencia dada. Una fuente más pequeña puede suministrar la misma potencia verdadera (watts)

▲ **FIGURA 16–36**

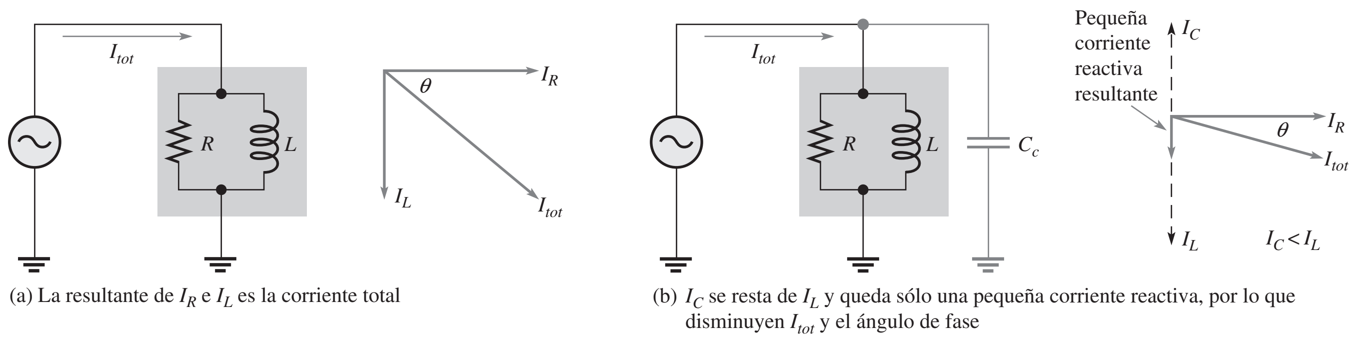
Ilustración del efecto del factor de potencia en requerimientos de sistema tales como capacidad de fuente (VA) y diámetro de conductor.

Aun cuando ambas cargas son equivalentes en función de la cantidad de trabajo realizado (potencia real), la carga mostrada en la figura 16-36(a) con el factor de potencia bajo consume más corriente de la fuente que la carga con el factor de potencia alto, figura 16-36(b), como indican los amperímetros. Por consiguiente, la fuente de la parte (a) debe tener capacidad de VA más alta que la fuente de la parte (b). Además, las líneas que conectan la fuente a la carga de la parte (a) deben ser de mayor calibre que las de la parte (b), una condición que llega a ser importante cuando se requieren líneas de transmisión muy largas, tal como en sistemas de distribución de potencia.

La figura 16-36 ha demostrado que un factor de potencia alto es una ventaja ya que permite suministrar potencia con más eficiencia a una carga.

Corrección del factor de potencia

El factor de potencia de una carga inductiva se incrementa con la adición de un capacitor en paralelo, como indica la figura 16-37. El capacitor compensa el retraso de fase de la corriente total al crear un componente capacitivo de corriente desfasado en 180° con respecto al componente inductivo. Esto tiene un efecto de cancelación y reduce el ángulo de fase (y el factor de potencia) tanto como la corriente total, según ilustra la figura.



(a) La resultante de I_R e I_L es la corriente total

(b) I_C se resta de I_L y queda sólo una pequeña corriente reactiva, por lo que disminuyen I_{tot} y el ángulo de fase

▲ FIGURA 16–37

Ejemplo de cómo se puede incrementar el factor de potencia con la adición de un capacitor compensador.

REPASO DE LA SECCIÓN 16-7

1. ¿A qué componente de un circuito *RL* se debe la disipación de potencia?
2. Calcule el factor de potencia cuando $\theta = 50°$.
3. Cierto circuito *RL* se compone de un resistor de 470 Ω y una reactancia inductiva de 620 Ω a la frecuencia de operación. Determine *P* y *Q* cuando $I = 100$ mA.

16–8 APLICACIONES BÁSICAS

En esta sección se abordan dos aplicaciones de circuitos *RL*. La primera es un circuito básico selector (filtro) de frecuencias. La segunda es el regulador conmutador, un circuito ampliamente utilizado en fuentes de potencia debido a su alta eficiencia. El regulador conmutador utiliza otros componentes, pero se hace hincapié en el circuito *RL*.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir dos ejemplos de aplicaciones de circuito *RL***
  - Analizar el modo en que opera un circuito *RL* como filtro
  - Analizar la ventaja de un inductor en un regulador conmutador

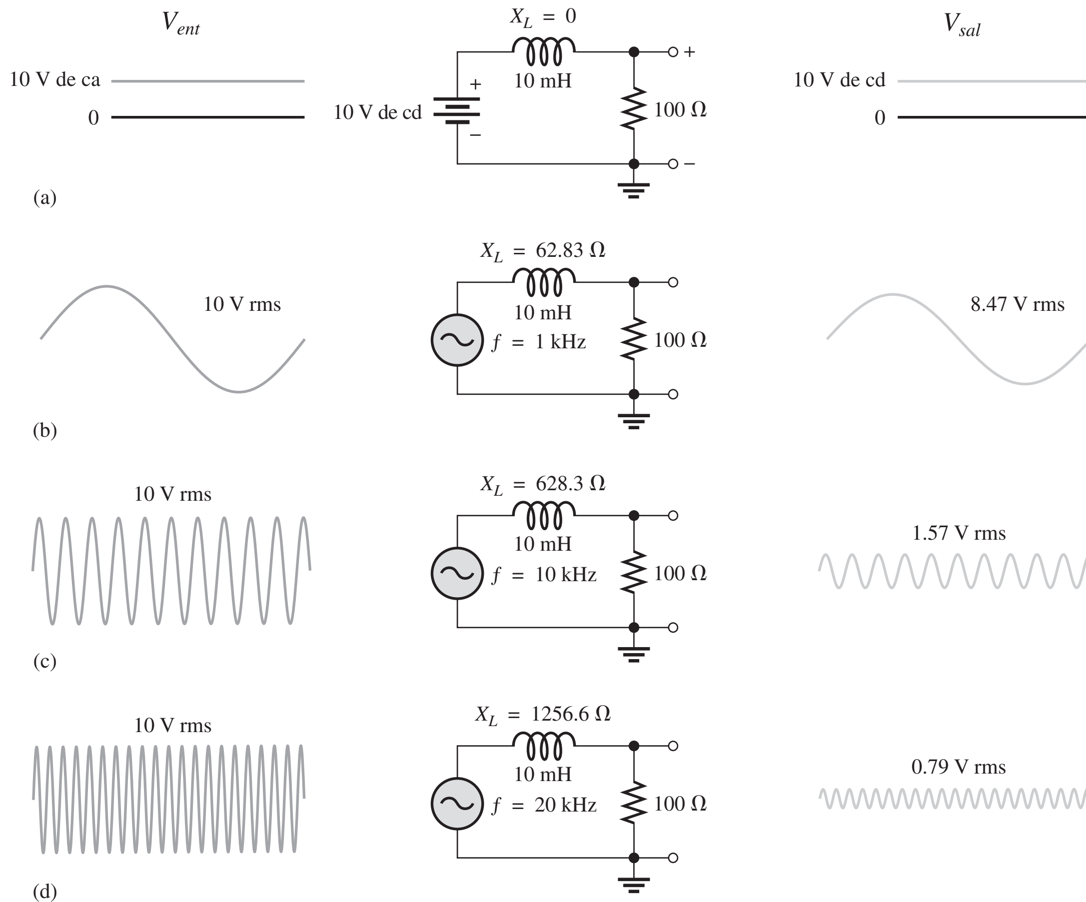
El circuito *RL* como filtro

Así como los circuitos *RC*, también los circuitos *RL* dispuestos en serie exhiben una característica selectora de frecuencia y, por consiguiente, actúan como filtros básicos.

Filtro pasabajas Se ha visto lo que le sucede a la magnitud de salida y al ángulo de fase en un circuito de retraso. En términos de la acción filtrante, la variación de la magnitud del voltaje de salida en función de la frecuencia es importante.

La figura 16-38 muestra la acción filtrante de un circuito *RL* en serie que utiliza valores específicos para propósitos de ilustración. En la parte (a) de la figura, la entrada es frecuencia cero (cd). Dado que idealmente el inductor actúa como un corto ante la corriente directa constante, el voltaje de salida es igual al valor total del voltaje de entrada (haciendo caso omiso de la resistencia de devanado). Por consiguiente, el circuito dejar pasar todo el voltaje de entrada hasta la salida (entran 10 V, salen 10 V).

En la figura 16-38(b), la frecuencia del voltaje de entrada se incrementó a 1 kHz, lo cual propicia que la reactancia inductiva se incremente hasta 62.83 Ω. Con un voltaje de entrada de 10 V rms, el voltaje de salida es aproximadamente de 8.47 V rms, y puede ser calculado aplicando el método del divisor de voltaje o la ley de Ohm.



▲ **FIGURA 16–38**

Acción filtrante pasabajas de un circuito *RL* (no se indica el desplazamiento de fase de la entrada a la salida).

En la figura 16-38(c), la frecuencia de entrada se incrementó a 10 kHz, permitiendo que la reactancia inductiva se incrementara a 628.3 Ω. Para un voltaje de entrada constante de 10 V rms, ahora el voltaje de salida es de 1.57 V rms.

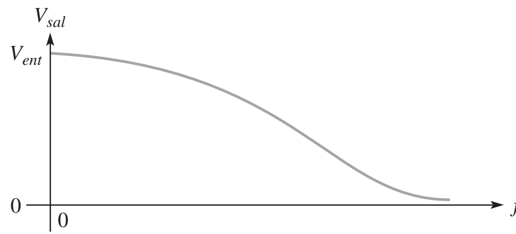
Conforme la frecuencia se incrementa aún más, el voltaje de salida continúa disminuyendo y tiende a cero a medida que la frecuencia llega a ser muy alta, como se ve en la figura 16-38(d) para $f = 20$ kHz.

Una descripción de la acción del circuito es como sigue: conforme se incrementa la frecuencia de la entrada, la reactancia inductiva también lo hace. Como la resistencia es constante y la reactancia inductiva aumenta, el voltaje entre los extremos del inductor se incrementa y el voltaje entre los extremos del resistor (voltaje de salida) disminuye. La frecuencia de entrada puede ser incrementada hasta que alcance un valor al cual la reactancia sea tan grande, comparada con la resistencia, que el voltaje de salida pueda ser ignorado porque llega a ser muy pequeño, comparado con el voltaje de entrada.

Como se muestra en la figura 16-38, el circuito dejar pasar la cd (frecuencia de cero) por completo. A medida que la frecuencia de la entrada se incrementa, a menos voltaje se le permite pasar hasta la salida. Es decir, el voltaje de salida disminuye conforme la frecuencia se incrementa. Aparentemente las frecuencias bajas pasan a través del circuito mucho mejor que las altas. Este circuito *RL* es, por consiguiente, una forma básica de filtro pasabajas.

La figura 16-39 muestra una curva de respuesta de un filtro pasabajas.

Filtro pasaaltas La figura 16-40 ilustra la acción filtrante pasaaltas, donde la salida se toma entre los extremos del inductor. Cuando el voltaje de salida es de cd (frecuencia de cero) en la parte (a), la salida es de cero volts porque el inductor aparece idealmente como un corto a la salida.



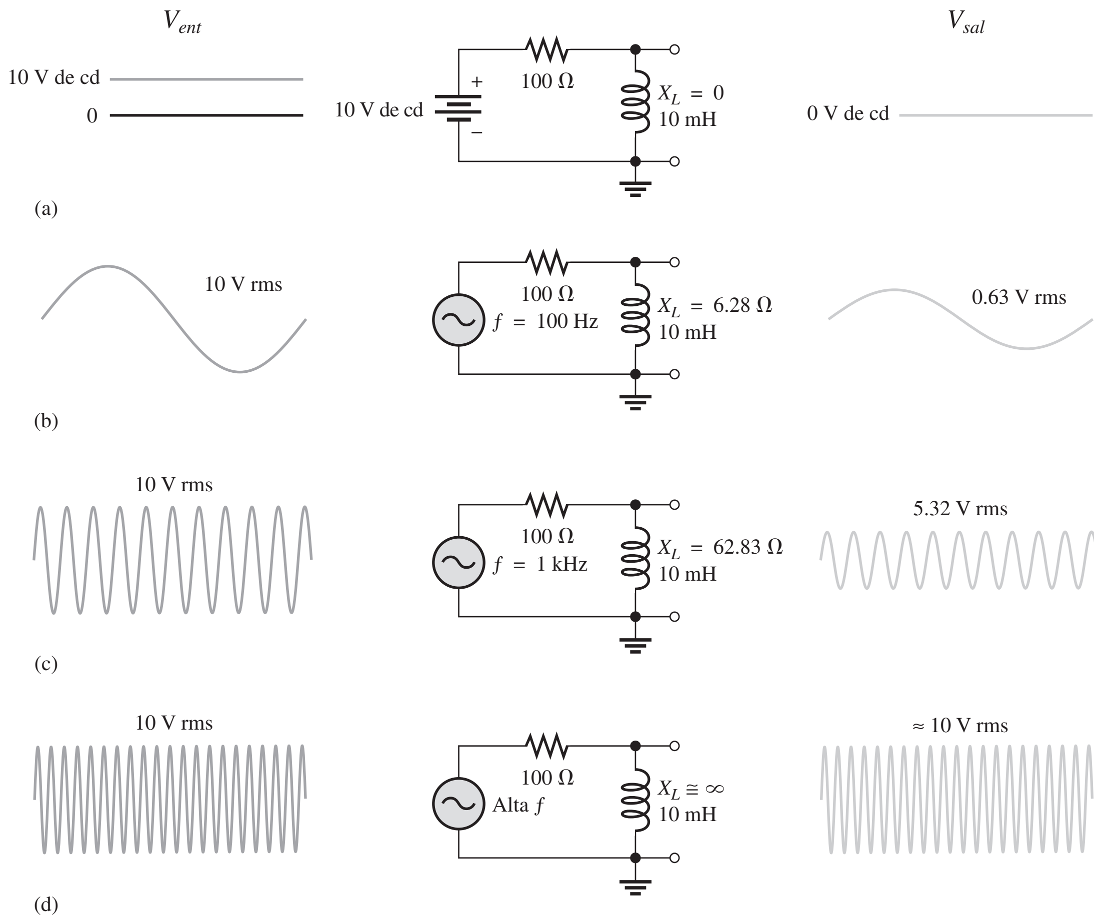
◀ **FIGURA 16–39**

Curva de respuesta de un filtro pasabajas.

En la figura 16-40(b), la frecuencia de la señal de entrada se incrementó a 100 Hz con valor rms de 10 V. El voltaje de salida es de 0.63 V rms. Por tanto, sólo un pequeño porcentaje del voltaje de entrada aparece a la salida a esta frecuencia.

En la figura 16-40(c), la frecuencia de entrada se incrementa a 1 kHz, lo cual permite que se desarrolle más voltaje por incremento de la reactancia inductiva. El voltaje de salida a esta frecuencia es de 5.32 V rms. Como puede verse, el voltaje de salida se incrementa conforme aumenta la frecuencia. Se alcanza un valor de frecuencia al cual la reactancia es muy grande en comparación con la resistencia y la mayor parte del voltaje aparece entre los extremos del inductor, como ilustra la figura 16-40(d).

Este circuito tiende a impedir que aparezcan señales de baja frecuencia en la salida, pero permite que señales de alta frecuencia pasen a través de él desde la entrada hasta la salida; por tanto, es una forma básica de filtro pasaaltas.



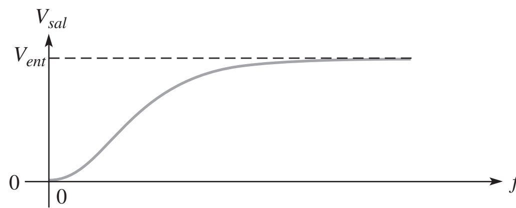
▲ **FIGURA 16–40**

Acción filtrante pasaaltas de un circuito *RL* (no se indica el desplazamiento de fase de la entrada a la salida).

La curva de respuesta ilustrada en la figura 16-41 muestra que el voltaje de salida se incrementa y luego se nivela al aproximarse al valor del voltaje de entrada a medida que aumenta la frecuencia.

▶ **FIGURA 16–41**

Curva de respuesta de filtro pasaaltas.

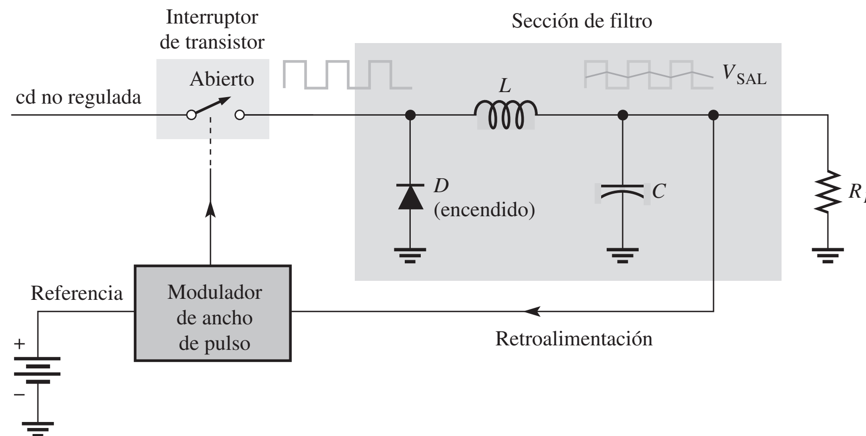


El regulador conmutador

En fuentes de potencia de conmutación de alta frecuencia, se utilizan inductores pequeños como parte esencial de la sección de filtro. Una fuente de potencia de conmutación es mucho más eficiente al convertir ca a cd que cualquier otro tipo de fuente. Por esta razón es ampliamente utilizada en computadoras y otros sistemas electrónicos. Un regulador conmutador controla con precisión el voltaje de cd. En la figura 16-42 se ilustra un tipo de regulador conmutador. Utiliza un conmutador electrónico para cambiar la cd no regulada a pulsos de alta frecuencia. La salida es el valor promedio de los pulsos. El ancho de los pulsos es controlado por el modulador de ancho de pulso, el cual enciende y apaga con rapidez un interruptor de transistor y luego es filtrado mediante la sección de filtro para producir cd regulada. (En la figura se exageraron las fluctuaciones para mostrar el ciclo). El modulador de ancho de pulso puede incrementar el ancho de pulso cuando la salida decae o reducirlo si la salida se eleva, con lo cual se mantiene un salida promedio constante en condiciones variables.

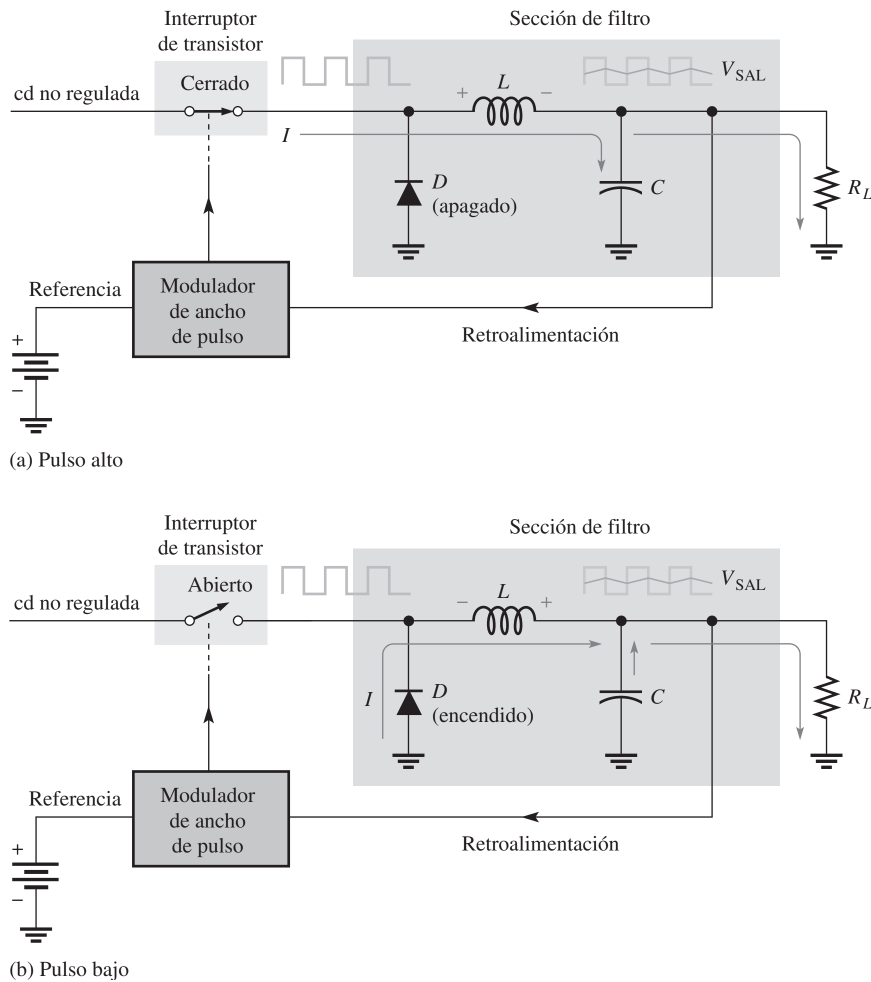
▶ **FIGURA 16–42**

Diagrama de bloques de un regulador conmutador.



La figura 16-43 ilustra la acción filtrante básica. El filtro se compone de un diodo, un inductor y un capacitor. El diodo es un dispositivo para corriente de un solo sentido que se estudiará en un curso de dispositivos. En esta aplicación, el diodo actúa como un interruptor de encendido-apagado que permite fluir a la corriente en una sola dirección.

Un componente importante de la sección de filtro es el inductor, el cual siempre tendrá corriente en este tipo de regulador. El voltaje promedio y el resistor de carga determinan la cantidad de corriente. Recuerde que la ley de Lenz establece que si se crea un voltaje inducido a través de una bobina aparecerá una fuerza opositora al *cambio* en la corriente de la misma. Cuando el interruptor de transistor se cierra, el pulso es alto y la corriente fluye por el inductor en dirección a la carga, como se muestra en la figura 16-43(a). En este momento el diodo está apagado. Observe que el inductor tiene un voltaje inducido a través de él que se opone al cambio en la corriente. Cuando el pulso se reduce, como en la figura 16-43(b), el transistor está apagado y el inductor desarrolla voltaje en dirección opuesta a la de antes. El diodo actúa como interruptor cerrado, el cual produce una trayectoria cerrada para la corriente. Esta acción tiende a mantener la corriente constante a través de la carga. El capacitor se suma a esta acción suavisadora al cargarse y descargarse en una pequeña cantidad durante el proceso.



▲ FIGURA 16–43

Acción de regulador conmutador.

REPASO DE LA SECCIÓN 16-8

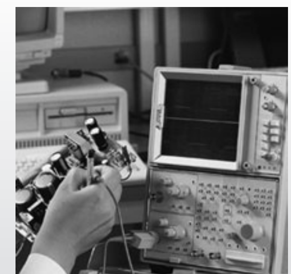
1. Cuando se utiliza un circuito *RL* como filtro pasabajas, ¿a través de qué componente se toma la salida?
2. ¿Cuál es la ventaja principal de un regulador conmutador?
3. ¿Qué le sucede al ancho de pulso de un regulador conmutador si el voltaje de salida decae?

16–9 LOCALIZACIÓN DE FALLAS

Las fallas en componentes típicos afectan la respuesta de circuitos *RL* básicos a la frecuencia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

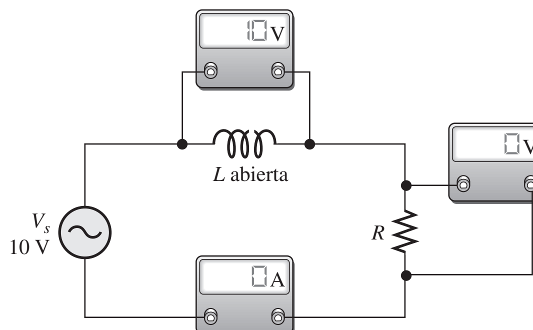
- **Localizar fallas en circuitos *RL***
  - Localizar un inductor abierto
  - Localizar un resistor abierto
  - Localizar una abertura en un circuito en paralelo



Efecto de un inductor abierto El modo de falla más común en inductores ocurre cuando el devanado se abre a consecuencia de corriente excesiva o de una falla de contacto mecánico. Es fácil advertir cómo afecta una bobina abierta la operación de un circuito *RL* en serie básico, según muestra la figura 16-44. Desde luego, no existe trayectoria para la corriente; por ello, el voltaje en el resistor es de cero y el voltaje total aplicado aparece entre las terminales del inductor. Si usted sospecha que hay una bobina abierta, retire uno o ambos conductores del circuito y verifique lo referente a continuidad utilizando un ohmmetro.

▶ **FIGURA 16–44**

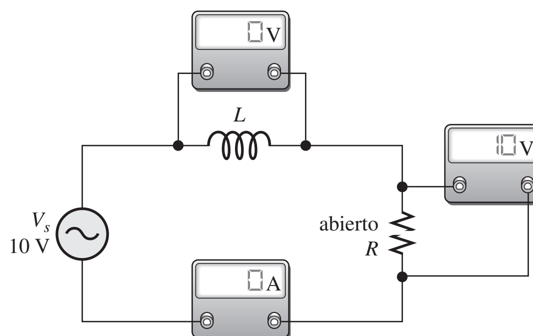
Efecto de una bobina abierta



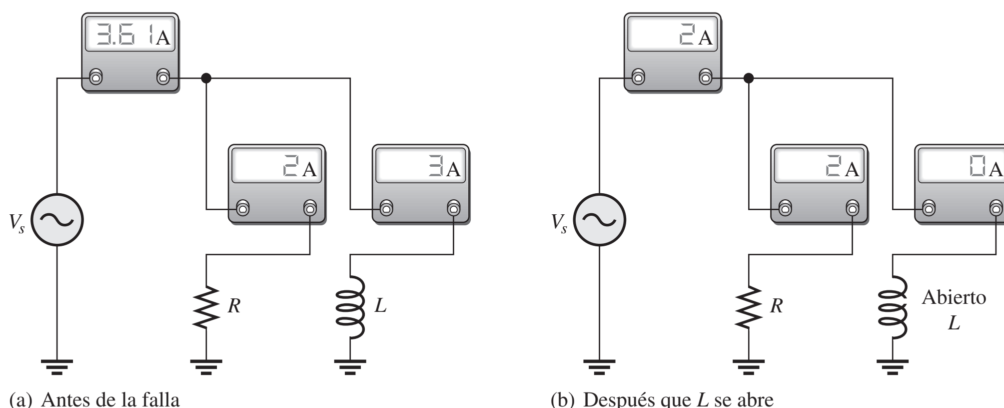
Efecto de un resistor abierto Cuando el resistor se abre, no hay corriente y el voltaje en el inductor es de cero. El voltaje total de entrada está a través del resistor abierto, como se muestra en la figura 16-45.

▶ **FIGURA 16–45**

Efecto de un resistor abierto.



Componentes abiertos en circuitos en paralelo En un circuito *RL* en paralelo, un resistor o un inductor abiertos harán que la corriente disminuya porque la impedancia total se incrementará. Desde luego, la rama con el componente abierto tendrá corriente de cero. La figura 16-46 ilustra estas condiciones.



▲ **FIGURA 16–46**

Efecto de un componente abierto en un circuito en paralelo con V_s constante.

Efecto de un inductor con devanados en cortocircuito Aun cuando es un evento muy raro, es posible que algunos de los devanados de una bobina estén en cortocircuito a consecuencia de aislamiento averiado. Este modo de falla es mucho menos probable que una bobina abierta y resulta difícil de detectar. Los devanados en cortocircuito pueden reducir la inductancia porque la inductancia de una bobina es proporcional al cuadrado de la cantidad de vueltas. Un corto entre los devanados reduce efectivamente la cantidad de vueltas, lo cual puede o no inducir un efecto adverso en el circuito.

Otras consideraciones sobre localización de fallas

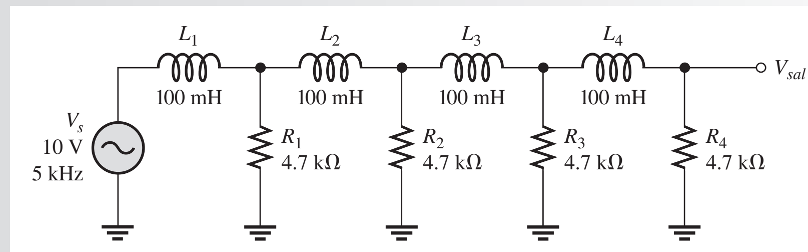
Tal como se aprendió, la falla de un circuito que le impide trabajar apropiadamente no siempre es resultado de un componente defectuoso. Un alambre suelto, un mal contacto, o una unión deficientemente soldada pueden causar un circuito abierto. Un corto puede ser provocado por la sujeción de un alambre o una rebaba de soldadura. Cosas tan simples como no enchufar una fuente de potencia o un generador de funciones suceden más menudo de lo que se pudiera pensar. Valores equivocados en un circuito (tal como un valor de resistor incorrecto), el generador de funciones puesto a la frecuencia equivocada o la salida incorrecta conectada al circuito pueden provocar una operación inapropiada.

Siempre habrá que revisar para asegurarse de que los instrumentos están correctamente conectados a los circuitos y a una toma de corriente. Asimismo, búsquense cosas obvias tales como un contacto roto o suelto, un conector que no está completamente enchufado, o un pedazo de alambre o un puente de soldadura que pudiera poner en cortocircuito a algo.

El ejemplo siguiente ilustra una forma de abordar la localización de fallas en un circuito que contiene inductores y resistores utilizando el método APM (análisis, planificación y medición) y la división a la mitad.

EJEMPLO 16–15 El circuito representado por el diagrama esquemático de la figura 16-47 no tiene voltaje de salida. El circuito está físicamente construido en una tarjeta prototipo. Use sus habilidades de localización de fallas para encontrar el problema.

▶ **FIGURA 16–47**

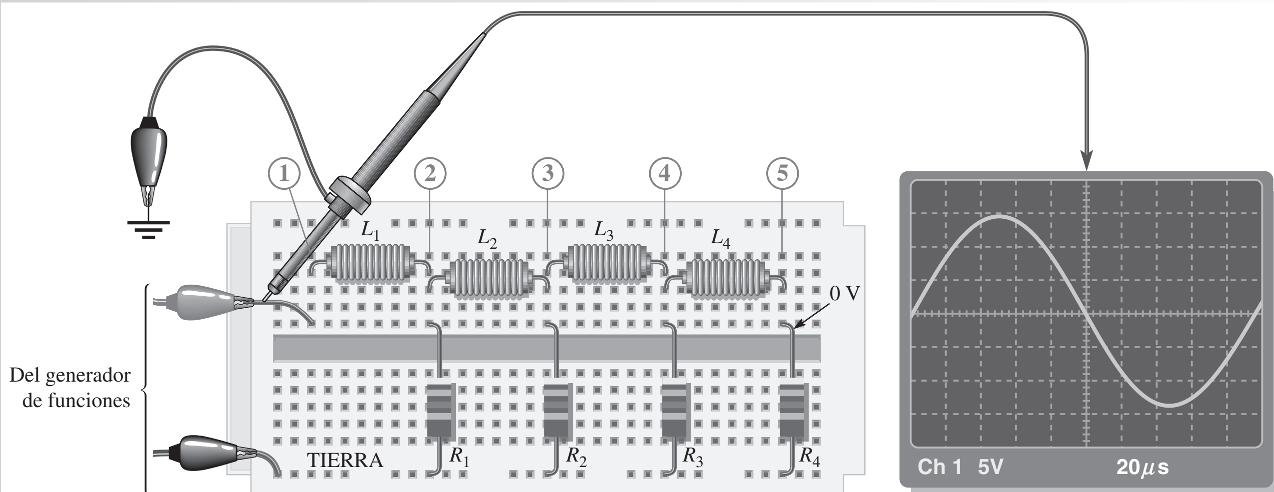


Solución Aplique el método APM a este problema de localización de fallas.

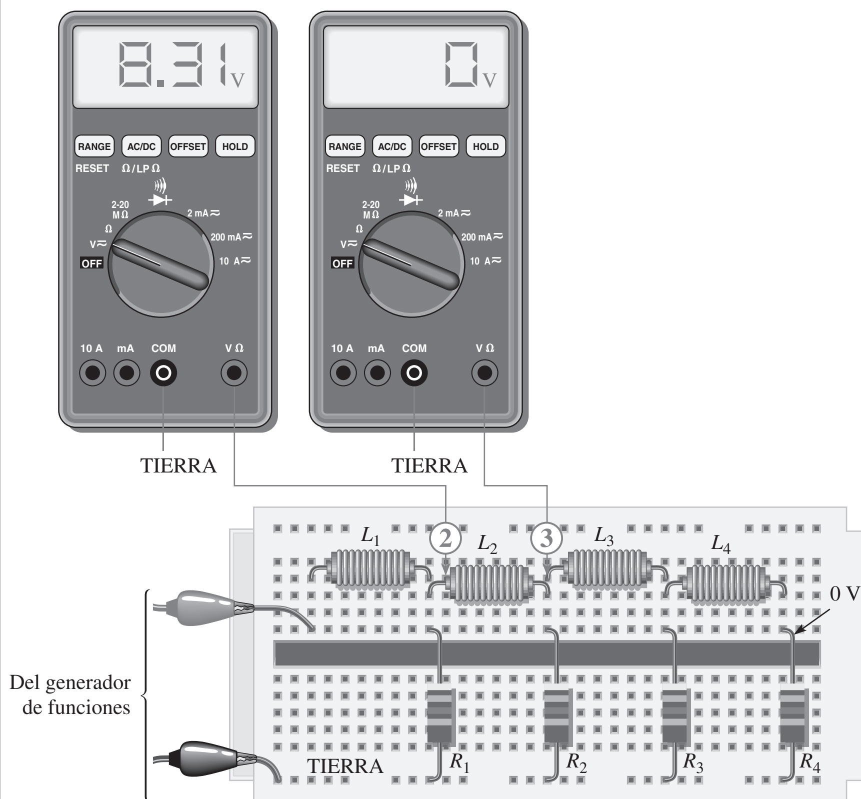
Análisis: Piense primero en las posibles causas de que el circuito no tenga voltaje de salida.

1. No hay fuente de voltaje o la frecuencia es tan alta que los inductores aparecen como si estuvieran abiertos porque sus reactancias son extremadamente altas comparadas con los valores de resistencia.
2. Hay un cortocircuito entre uno de los resistores y tierra. O un resistor podría estar en cortocircuito, o podría haber algún cortocircuito físico. Un resistor en cortocircuito no es una falla común.
3. Hay un abertura entre la fuente y la salida. La abertura impediría que la corriente fluya, y por tanto haría que el voltaje sea de cero. Un inductor podría estar abierto, o la trayectoria conductiva podría estar abierta a causa de un alambre de conexión roto o suelto o por un mal contacto en la tarjeta prototipo.
4. Hay un valor de componente incorrecto. Un resistor podría ser tan pequeño que el voltaje entre sus terminales resulte insignificante. Un inductor podría ser tan grande que su reactancia a la frecuencia de entrada resulte extremadamente alta.

Planificación: Usted decide realizar algunas verificaciones visuales en busca de problemas tales como el cordón de energía del generador de funciones no enchufado o la frecuencia puesta a un valor incorrecto. También, conductores rotos, conductores en cortocircuito, así como un código de colores para resistor o un valor de inductor incorrectos pueden ser localizados visual-



(a) El osciloscopio muestra el voltaje correcto a la entrada. No se muestra el cable de tierra del sensor del osciloscopio



(b) Un voltaje de cero en el punto ③ indica que la falla está entre punto ③ y la fuente. Una lectura de 10 V en el punto ② indica que L_2 está abierto

▲ **FIGURA 16–48**

mente. Si no descubre nada luego de una verificación visual, entonces medirá el voltaje para rastrear la causa del problema. Decide utilizar un osciloscopio digital y un DMM para realizar las mediciones mediante la técnica de división a la mitad para aislar más rápidamente la falla.

Medición: Suponga que se da cuenta de que el generador de funciones está enchufado y que la frecuencia parece ser la correcta. Además, no encuentra aberturas o cortos visibles durante su inspección visual, y los valores de los componentes son correctos.

El primer paso en el proceso de medición es inspeccionar con el osciloscopio el voltaje proveniente de la fuente. Suponga que se observa una onda seno de 10 V rms con una frecuencia de 5 kHz a la entrada del circuito, según muestra la figura 16-48(a). El voltaje de ca correcto está presente, así que *la primera causa posible ha sido eliminada*.

A continuación, inspeccione en busca de un corto desconectando la fuente y colocando el DMM (puesto en la función de ohmmetro) a través de cada resistor. Si cualquier resistor se pone en cortocircuito (improbable), el medidor leerá cero o una resistencia muy pequeña. Suponiendo que las lecturas del medidor son correctas, *la segunda posible causa ha sido eliminada*.

Cuando el voltaje se ha "perdido" en algún lugar situado entre la entrada y la salida, ahora usted debe buscarlo. Vuelve a conectar la fuente y, utilizando la técnica de división a la mitad, mide el voltaje en el punto ③ (a la mitad del circuito) con respecto a tierra. El cable de prueba del DMM se coloca en el conductor derecho del inductor L_2, como indica la figura 16-48(b). Suponga que el voltaje en este punto es de cero. Esto indica que la parte del circuito situada a la derecha del punto ③ probablemente está bien y que la falla se encuentra en el circuito entre el punto ③ y la fuente.

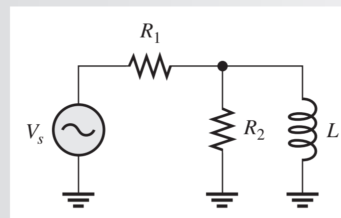
Ahora, empiece a rastrear el circuito en reversa hacia la fuente en busca del voltaje (también podría comenzar desde la fuente y trabajar hacia adelante). Colocando el cable de prueba del medidor en el punto ②, en el conductor izquierdo del inductor L_2, se obtiene una lectura de 8.31 V como ilustra la figura 16-48(b). Esto, desde luego, indica que L_2 está abierto. Por fortuna, en este caso, un componente y no un contacto en la tarjeta está defectuoso. Casi siempre es más fácil reemplazar un componente que reparar un contacto defectuoso.

Problema relacionado Suponga que midió 0 V en el conductor izquierdo de L_2 y 10 V en el conductor derecho de L_1. ¿Qué indicaría esto?

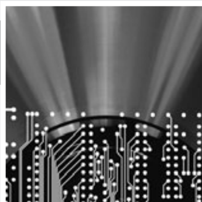
REPASO DE LA SECCIÓN 16-9

1. **Describa el efecto de un inductor con devanados en cortocircuito en la respuesta de un circuito *RL* en serie.**
2. **En el circuito de la figura 16-49, indique si I_{tot}, V_{R1} y V_{R2} se incrementan o disminuyen como resultado de la abertura en *L*.**

▶ FIGURA 16–49



Una aplicación de circuito



A usted le entregan dos módulos retirados de un sistema de comunicaciones que va a ser modificado. Cada módulo tiene tres terminales y está marcado como filtro *RL*, pero no se dan especificaciones. Se le pide probar los módulos para determinar el tipo de filtros y los valores de componente.

Los módulos sellados tienen tres terminales identificadas con ENT, TIERRA, SAL como se muestra en la figura 16-50. Usted aplicará sus conocimientos sobre circuitos *RL* en serie y realizará algunas mediciones básicas para determinar la configuración del circuito interno y los valores de componente.

Medición con ohmmetro en el módulo 1

- ◆ Determine la disposición de los dos componentes y los valores del resistor y la resistencia de devanado para el módulo 1 indicados por las lecturas del medidor en la figura 16-50.

Medición de ca en el módulo 1

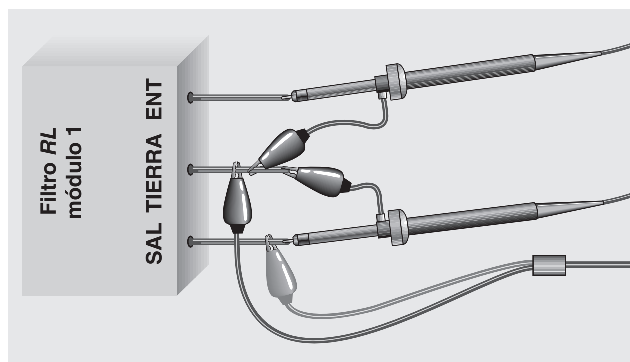
- ◆ Determine el valor de inductancia para el módulo 1 indicado por la configuración de prueba de la figura 16-51.

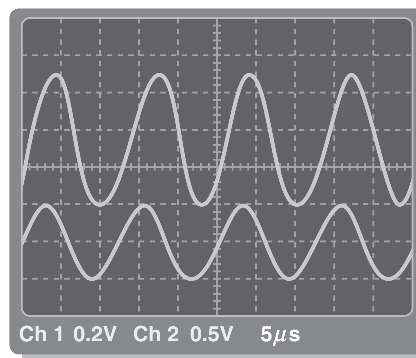
▶ FIGURA 16–50

Mediciones con ohmmetro en el módulo 1.









▲ FIGURA 16–51

Mediciones de ca en el módulo 1.

Medición con ohmmetro en el módulo 2

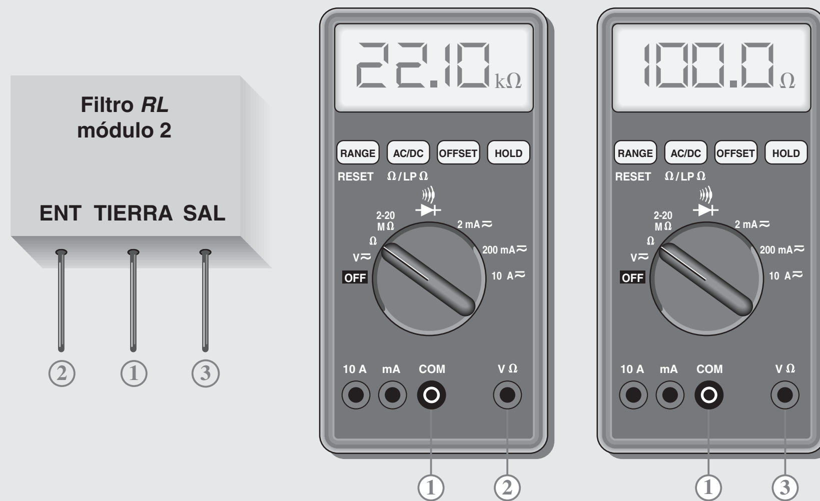
◆ Determine la disposición de los dos componentes y los valores del resistor y la resistencia de devanado para el módulo 2 indicados por las lecturas del medidor en la figura 16-52.

Medición de ca en el módulo 2

◆ Determine el valor de inductancia para el módulo 2 indicado por la configuración de prueba mostrada en la figura 16-53.

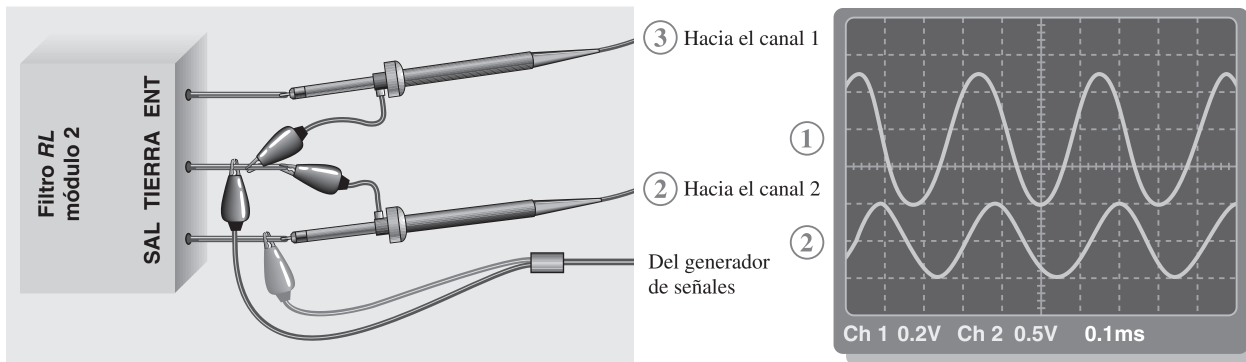
Repaso

1. Si el inductor localizado en el módulo 1 estuviera abierto, ¿cuál sería la lectura en la salida con la configuración de prueba de la figura 16-51?
2. Si el inductor localizado en el módulo 2 estuviera abierto, ¿cuál sería la lectura en la salida con la configuración de la figura 16-53?



◀ **FIGURA 16–52**

Mediciones con ohmmetro en el módulo 2.



▲ **FIGURA 16–53**

Mediciones de ca para el módulo 2.

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

La cobertura de temas especiales continúa en el capítulo 17, parte 4, en la página 757.

RESUMEN

- Cuando se aplica un voltaje sinusoidal a un circuito *RL*, la corriente y todas las caídas de voltaje son ondas senoidales.
- La corriente total en un circuito *RL* en serie o en paralelo siempre se retrasa con respecto al voltaje de fuente.
- El voltaje a través del resistor siempre está en fase con la corriente.
- En un inductor ideal, el voltaje siempre aparece 90° por delante de la corriente.
- En un circuito de retraso, el voltaje de salida se retrasa con respecto al voltaje de entrada.
- En un circuito de adelanto, el voltaje de salida se adelanta al voltaje de entrada.
- En un circuito *RL*, tanto la resistencia como la reactancia inductiva combinadas determinan la impedancia.
- La impedancia se expresa en unidades de ohms.
- La impedancia de un circuito *RL* varía directamente con la frecuencia.
- El ángulo de fase (θ) de un circuito *RL* en serie varía directamente con la frecuencia.
- Se puede determinar la impedancia de un circuito midiendo el voltaje aplicado y la corriente total y utilizando luego la ley de Ohm.
- En un circuito *RL*, una parte de la potencia es resistiva y otra parte es reactiva.
- El factor de potencia indica cuánto de la potencia aparente es potencia verdadera.
- Un factor de potencia de 1 indica un circuito puramente resistivo, y un factor de potencia de 0 indica un circuito puramente reactivo.
- Un filtro deja pasar ciertas frecuencias y rechaza otras.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas incluidos en el capítulo se definen en el glosario que aparece al final del libro.

Reactancia inductiva Es la oposición de un inductor a corriente sinusoidal. La unidad es el ohm.

Susceptancia inductiva (B_L) Habilidad de un inductor de permitir el flujo de corriente; es el recíproco de la reactancia inductiva. La unidad es el siemens (S).

FÓRMULAS

Circuitos *RL* en serie

16–1 $\mathbf{Z} = R + jX_L$

16–2 $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

16–3 $\mathbf{V}_s = V_R + jV_L$

16–4 $\mathbf{V}_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right)$

Circuito de adelanto

16–5 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$

16–6 $\mathbf{V}_{sal} = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{ent}$

Circuito de retraso

16–7 $\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$

16–8 $\mathbf{V}_{sal} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{ent}$

Circuitos *RL* en paralelo

16–9 $\mathbf{Z} = \left(\frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$

16–10 $\mathbf{Y} = G - jB_L$

16–11 $\mathbf{I}_{tot} = I_R - jI_L$

16–12 $\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}\angle-\tan^{-1}\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$

Potencia en circuitos *RL*

16–13 $P_r = I^2X_L$

AUTOEVALUACIÓN Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. En un circuito *RL* en serie, el voltaje a través del resistor
   (a) se adelanta al voltaje aplicado **(b)** se retrasa con respecto al voltaje aplicado
   (c) está en fase con el voltaje aplicado **(d)** está en fase con la corriente
   (e) las respuestas (a) y (d) **(f)** las respuestas (b) y (d)
2. Cuando la frecuencia del voltaje aplicado a un circuito *RL* en serie se incrementa, la impedancia
   (a) disminuye **(b)** aumenta **(c)** no cambia
3. Cuando la frecuencia del voltaje aplicado a un circuito *RL* en serie disminuye, el ángulo de fase
   (a) disminuye **(b)** se incrementa **(c)** no cambia
4. Si la frecuencia se duplica y la resistencia es reducida a la mitad, la impedancia de un circuito *RL* en serie
   (a) se duplica **(b)** se reduce a la mitad
   (c) permanece constante **(d)** no puede determinarse sin valores
5. Para reducir la corriente en un circuito *RL* en serie, la frecuencia deberá
   (a) incrementarse **(b)** reducirse **(c)** permanecer constante
6. En un circuito *RL* en serie, se miden 10 V rms entre las terminales del resistor y 10 V rms entre las del inductor. El valor pico del voltaje de fuente es de
   (a) 14.14 V **(b)** 28.28 V **(c)** 10 V **(d)** 20 V
7. Los voltajes mencionados en el problema 6 se miden a cierta frecuencia. Para hacer que el voltaje en el resistor sea mayor que el voltaje en el inductor, la frecuencia
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** se duplica **(d)** no es un factor
8. Cuando en un circuito *RL* en serie el voltaje entre las terminales de un resistor llega a ser más grande que el voltaje del inductor, el ángulo de fase
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no se ve afectado
9. Cuando la frecuencia del voltaje de fuente se incrementa, la impedancia de un circuito *RL* en paralelo
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** permanece constante
10. En un circuito *RL* en paralelo, hay 2 A rms en la rama resistiva y 2 A rms en la rama inductiva. La corriente rms total es de
    (a) 4 A **(b)** 5.656 A **(c)** 2 A **(d)** 2.828 A
11. Usted está observando dos formas de onda de voltaje en un osciloscopio. La base de tiempo (tiempo-/división) del osciloscopio se ajusta de modo que medio ciclo de las formas de onda abarque las diez divisiones horizontales. El cruce por cero dirigido a positivo de una forma de onda se localiza en la división extrema izquierda, y el cruce por cero dirigido a positivo de la otra forma ocurre tres divisiones hacia la derecha. El ángulo de fase entre estas dos formas de onda es de
    (a) 18° **(b)** 36° **(c)** 54° **(d)** 180°
12. ¿Cuál de los siguientes factores de potencia propicia que menos energía se convierta en calor en un circuito *RL*?
    (a) 1 **(b)** 0.9 **(c)** 0.5 **(d)** 0.1

13. Si una carga es puramente inductiva y la potencia reactiva es de 10 VAR, la potencia aparente es de
    (a) 0 VA **(b)** 10 VA **(c)** 14.14 VA **(d)** 3.16 VA
14. Para cierta carga, la potencia real es de 10 W y la potencia reactiva es de 10 VAR, la potencia aparente es de
    (a) 5 VA **(b)** 20 VA **(c)** 14.14 VA **(d)** 100 VA

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 16-56.

1. Si L se abre, el voltaje a través de él
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
2. Si R se abre, el voltaje a través de L
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
3. Si la frecuencia se incrementa, el voltaje a través de R
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 16-63.

4. Si L se abre, el voltaje a través de R
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
5. Si f se incrementa, la corriente a través de R
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 16-69.

6. Si R_1 se abre, la corriente a través de L_1
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
7. Si L_2 se abre, el voltaje a través de R_2
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 16-70.

8. Si L_2 se abre, el voltaje desde el punto B hasta tierra
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
9. Si L_1 se abre, el voltaje desde el punto B hasta tierra
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
10. Si la frecuencia del voltaje de fuente se incrementa, la corriente a través de R_1
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
11. Si la frecuencia del voltaje de fuente disminuye, el voltaje desde el punto A hasta tierra
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 16-73.

12. Si L_2 se abre, el voltaje a través de L_1
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
13. Si R_1 se abre, el voltaje de salida
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
14. Si R_3 se abre, el voltaje de salida
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
15. Si se desarrolla un corto parcial en L_1, la corriente a través de la fuente
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
16. Si la frecuencia de la fuente se incrementa, el voltaje de salida
    (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas impares se encuentran al final del libro.

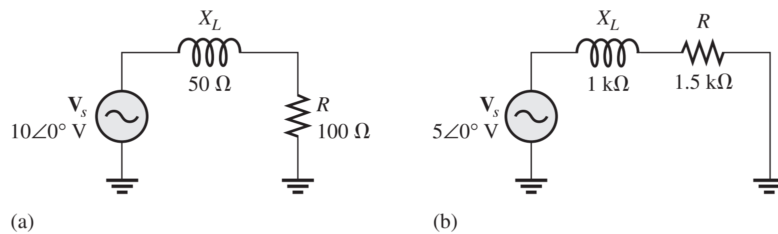
PARTE 1: CIRCUITOS EN SERIE

SECCIÓN 16–1 Respuesta sinusoidal de circuitos *RL* en serie

1. Se aplica un voltaje sinusoidal de 15 kHz a un circuito *RL* en serie. ¿Cuál es la frecuencia de I, V_R y V_L?
2. ¿Cuáles son las formas de onda de I, V_R y V_L en el problema 1?

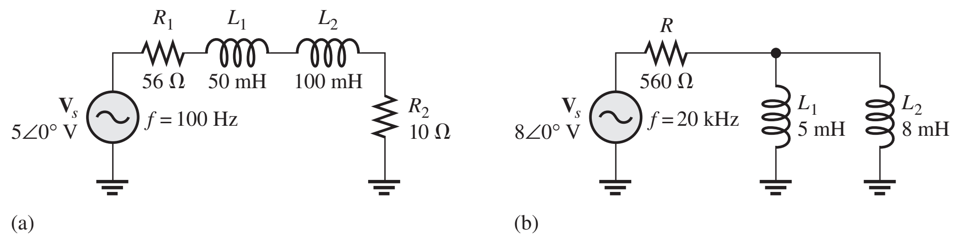
SECCIÓN 16–2 Impedancia de circuitos *RL* en serie

3. Exprese la impedancia total de cada circuito de la figura 16-54 tanto en forma polar como rectangular.



▲ FIGURA 16–54

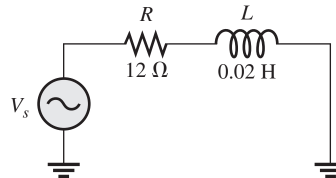
4. Determine la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase en cada circuito de la figura 16-55. Trace los diagramas de impedancia.



▲ FIGURA 16–55

5. En la figura 16-56, determine la impedancia para cada una de las siguientes frecuencias:
   (a) 100 Hz **(b)** 500 Hz **(c)** 1 kHz **(d)** 2 kHz

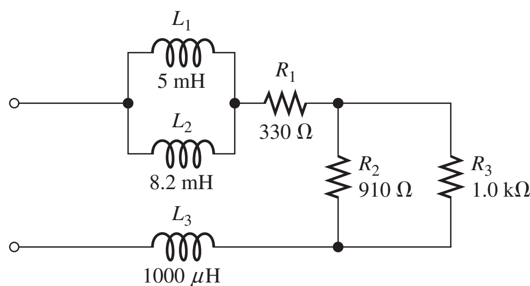
▶ FIGURA 16–56



6. Determine los valores de R y X_L en un circuito *RL* en serie con los siguientes valores de impedancia total:
   (a) $\mathbf{Z} = 20\ \Omega + j45\ \Omega$ **(b)** $\mathbf{Z} = 500\angle 35°\ \Omega$
   (c) $\mathbf{Z} = 2.5\angle 72.5°\ \text{k}\Omega$ **(d)** $\mathbf{Z} = 998\angle 45°\ \Omega$

7. Reduzca el circuito de la figura 16-57 a una sola resistencia e inductancia en serie.

▶ **FIGURA 16–57**



SECCIÓN 16–3 Análisis de circuitos *RL* en serie

8. Se aplica un voltaje sinusoidal de 5 V, 10 kHz al circuito de la figura 16-57. Calcule el voltaje a través de la resistencia total encontrada en el problema 7.

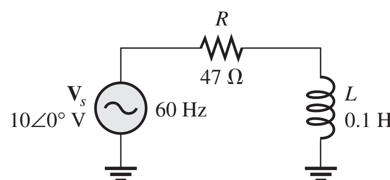
9. Con el mismo voltaje aplicado en el problema 8, determine el voltaje a través de L_3 para el circuito de la figura 16-57.

10. Exprese la corriente en forma polar para cada circuito de la figura 16-54.

11. Calcule la corriente total en cada circuito de la figura 16-55 y exprésela en forma polar.

12. Determine θ para el circuito de la figura 16-58.

▶ **FIGURA 16–58**



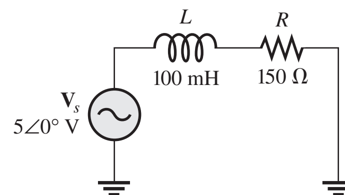
13. Si se duplica la inductancia que aparece en la figura 16-58, ¿en cuántos grados aumenta o disminuye θ?

14. Trace las formas de onda de V_s, V_R y V_L en la figura 16-58. Muestre las relaciones de fase apropiadas.

15. Para el circuito de la figura 16-59, encuentre V_R y V_L para cada una de las siguientes frecuencias:

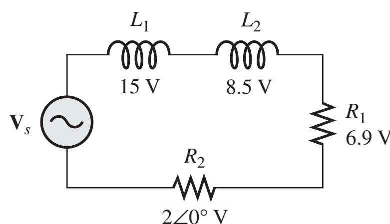
(a) 60 Hz **(b)** 200 Hz **(c)** 500 Hz **(d)** 1 kHz

▶ **FIGURA 16–59**



16. Determine la magnitud y el ángulo de fase del voltaje de fuente en la figura 16-60.

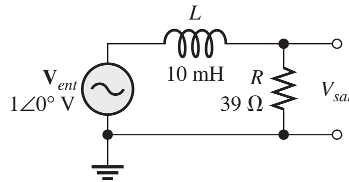
▶ **FIGURA 16–60**



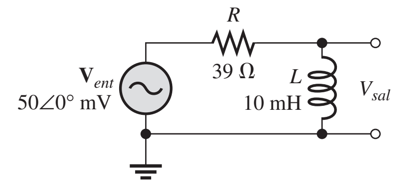
17. Para el circuito de retraso de la figura 16-61, determine el retraso de fase del voltaje de salida con respecto a la entrada a las siguientes frecuencias:

(a) 1 Hz **(b)** 100 Hz **(c)** 1 kHz **(d)** 10 kHz

18. Repita el problema 17 para el circuito de adelanto para encontrar el adelanto de fase en la figura 16-62.



▲ FIGURA 16–61



▲ FIGURA 16–62

PARTE 2 CIRCUITOS EN PARALELO

SECCIÓN 16–4 Impedancia y admitancia de circuitos *RL* en paralelo

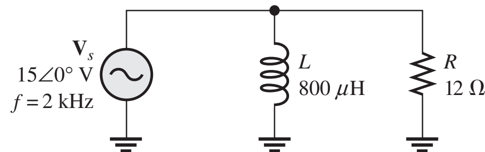
19. ¿Cuál es la impedancia expresada en forma polar para el circuito de la figura 16-63?

20. Repita el problema 19 para las siguientes frecuencias:

(a) 1.5 kHz **(b)** 3 kHz **(c)** 5 kHz **(d)** 10 kHz

21. ¿A qué frecuencia X_L es igual a R en la figura 16-63?

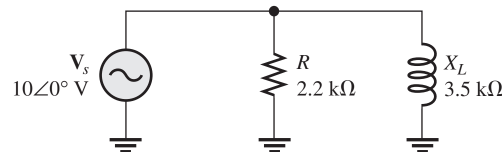
▶ FIGURA 16–63



SECCIÓN 16–5 Análisis de circuitos RL en paralelo

22. Encuentre la corriente total y cada corriente de rama en la figura 16-64.

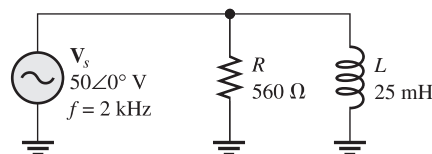
▶ FIGURA 16–64



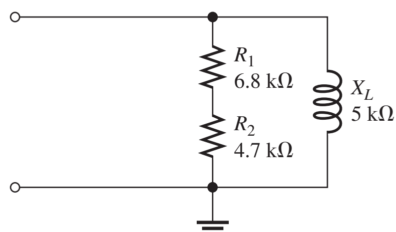
23. Determine las siguientes cantidades en la figura 16-65:

(a) $\mathbf{Z}$ **(b)** $\mathbf{I}_R$ **(c)** $\mathbf{I}_L$ **(d)** $\mathbf{I}_{tot}$ **(e)** θ

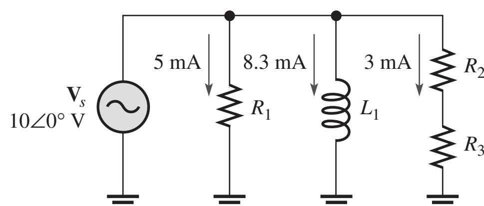
▶ FIGURA 16–65



24. Repita el problema 23 para $R = 56\ \Omega$ y $L = 330\ \mu$H.



▲ FIGURA 16–66



▲ FIGURA 16–67

25. Convierta el circuito mostrado en la figura 16-66 en uno equivalente en serie.

26. Determine la magnitud y el ángulo de fase de la corriente total que aparece en la figura 16-67.

PARTE 3: CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

SECCIÓN 16–6 Análisis de circuitos *RL* en serie-paralelo

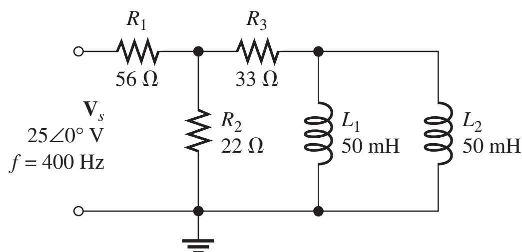
27. Determine los voltajes en forma polar a través de cada uno de los elementos de la figura 16-68. Trace el diagrama fasorial de voltaje.

28. ¿Es el circuito de la figura 16-68 predominantemente resistivo o predominantemente inductivo?

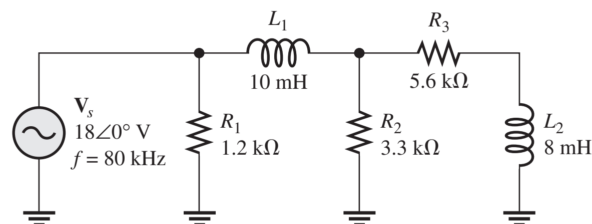
29. Determine la corriente en cada rama y la corriente total en la figura 16-68. Expréselas en forma polar. Trace el diagrama fasorial de la corriente.

30. Para el circuito de la figura 16-69, determine lo siguiente:

(a) $\mathbf{I}_{tot}$ **(b)** θ **(c)** $\mathbf{V}_{R1}$ **(d)** $\mathbf{V}_{R2}$ **(e)** $\mathbf{V}_{R3}$ **(f)** $\mathbf{V}_{L1}$ **(g)** $\mathbf{V}_{L2}$



▲ FIGURA 16–68



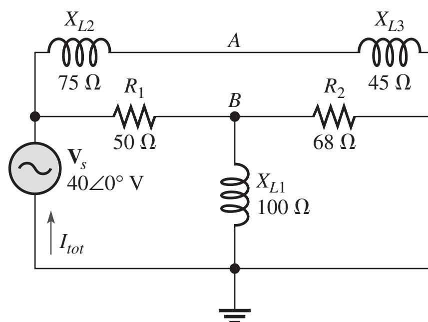
▲ FIGURA 16–69

***31.** Para el circuito de la figura 16-70, determine lo siguiente:

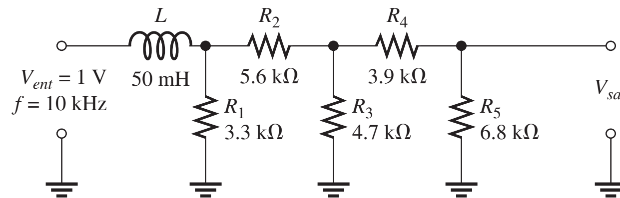
(a) $\mathbf{I}_{tot}$ **(b)** $\mathbf{V}_{L1}$ **(c)** $\mathbf{V}_{AB}$

***32.** Trace el diagrama fasorial de los voltajes y las corrientes que aparecen en la figura 16-70.

▶ FIGURA 16–70

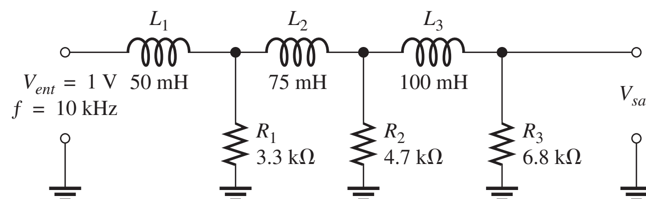


33. Determine el desplazamiento de fase y la atenuación (relación de V_{sal} a V_{ent}) desde la entrada hasta la salida en el circuito de la figura 16-71.



▲ FIGURA 16–71

* **34.** Determine el desplazamiento de fase y la atenuación desde la entrada hasta la salida para la red en configuración de escalera de la figura 16-72.



▲ FIGURA 16–72

35. Diseñe un circuito conmutador inductivo ideal que suministre un voltaje momentáneo de 2.5 kV con una fuente de 12 V de cd cuando un interruptor es cambiado instantáneamente de una posición a otra. El consumo de corriente de la fuente no debe exceder de 1 A.

PARTE 4: TEMAS ESPECIALES

SECCIÓN 16–7 Potencia en circuitos *RL*

36. En cierto circuito *RL*, la potencia verdadera es de 100 mW, y la potencia reactiva de 340 mVAR. ¿Cuál es la potencia aparente?

37. Determine la potencia verdadera y la potencia reactiva en la figura 16-58.

38. ¿Cuál es el factor de potencia en la figura 16-64?

39. Determine *P, Q*, *S* y *FP* para el circuito de la figura 16-69. Trace el triángulo de potencia.

***40.** Determine la potencia verdadera para el circuito de la figura 16-70.

SECCIÓN 16–8 Aplicaciones básicas

41. Trace la curva de respuesta para el circuito de la figura 16-61. Muestre el voltaje de salida contra la frecuencia en incrementos de 1 kHz desde 0 Hz hasta 5 kHz.

42. Con el mismo procedimiento del problema 41, trace la curva de respuesta para la figura 16-62.

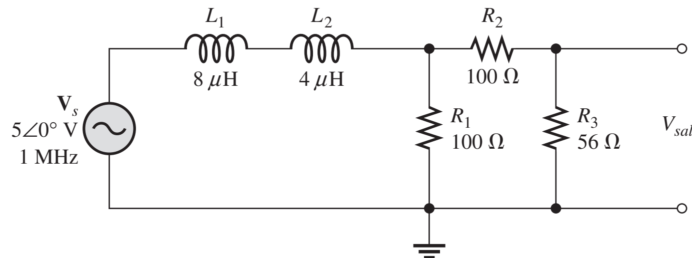
43. Trace el diagrama fasorial de voltaje para cada circuito de las figuras 16-61 y 16-62 a una frecuencia de 8 kHz.

SECCIÓN 16–9 Localización de fallas

44. Determine el voltaje a través de cada componente mostrado en la figura 16-73 si L_1 está abierto.

45. Determine el voltaje de salida en la figura 16-73 para cada uno de los siguientes modos de falla:
(a) L_1 abierto **(b)** L_2 abierto **(c)** R_1 abierto **(d)** un cortocircuito a través de R_2

▶ FIGURA 16–73





Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren el uso del CD-ROM Multisim.

46. Abra el archivo P16-46 y determine si existe una falla. Si la hay, localícela.

47. Abra el archivo P16-47 y determine si existe una falla. Si la hay, localícela.

48. Abra el archivo P16-48 y determine si existe una falla. Si la hay, localícela.

49. Abra el archivo P16-49 y determine si existe una falla. Si la hay, localícela.

50. Abra el archivo P16-50 y determine si existe una falla. Si la hay, localícela.

51. Abra el archivo P16-51 y determine si existe una falla. Si la hay, localícela.

52. Abra el archivo P16-52 y determine la respuesta a la frecuencia del filtro.

53. Abra el archivo P16-53 y determine la respuesta a la frecuencia del filtro.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 16–1 Respuesta sinusoidal de circuitos *RL* en serie

1. La frecuencia de la corriente es de 1 kHz.

2. El ángulo de fase es de cerca de 0°.

SECCIÓN 16–2 Impedancia de circuitos *RL* en serie

1. $R = 150\ \Omega$; $X_L = 220\ \Omega$

2. $\mathbf{Z} = R + jX_L = 33\ \text{k}\Omega + j50\ \text{k}\Omega$; $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}(X_L/R) = 59.9\angle 56.6°\ \text{k}\Omega$

SECCIÓN 16–3 Análisis de circuitos *RL* en serie

1. $V_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} = 3.61\ \text{V}$

2. $\theta = \tan^{-1}(V_L/V_R) = 56.3°$

3. Cuando f se incrementa, también X_L, Z y θ lo hacen.

4. $\phi = 81.9°$

5. $V_{sal} = 9.90\ \text{V}$

SECCIÓN 16–4 Impedancia y admitancia de circuitos *RL* en paralelo

1. $Y = \dfrac{1}{Z} = \dfrac{1}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = 2\ \text{mS}$

2. $Y = \dfrac{1}{Z} = 25.1\ \text{mS}$

3. **I** se retrasa con respecto a V_s; $\theta = 32.1°$

SECCIÓN 16–5 Análisis de circuitos *RL* en paralelo

1. $I_{tot} = 32\text{ mA}$
2. $\mathbf{I}_{tot} = 23.3\angle -59.0°\text{ mA}$; θ es con respecto al voltaje de entrada.
3. $\theta = -90°$

SECCIÓN 16–6 Análisis de circuitos *RL* en serie-paralelo

1. $\mathbf{Z} = 494\angle 59.0°\ \Omega$
2. $I_{tot} = 10.4\text{ mA} - j17.3\text{ mA}$

SECCIÓN 16–7 Potencia en circuitos *RL*

1. La disipación de potencia se debe a la resistencia.
2. $FP = 0.643$.
3. $P_{\text{real}} = 4.7\text{ W}$; $P_r = 6.2\text{ VAR}$; $P_a = 7.78\text{ VA}$

SECCIÓN 16–8 Aplicaciones básicas

1. La salida es a través del resistor.
2. Es más eficiente que otros tipos.
3. Es ajustado por el modulador de ancho de pulso para que sea más largo.

SECCIÓN 16–9 Localización de fallas

1. Los devanados en cortocircuito reducen L y por tanto reducen X_L a cualquier frecuencia dada.
2. I_{tot} disminuye, V_{R1} disminuye, V_{R2} disminuye.

Una aplicación de circuito

1. $V_{sal} = 0\text{ V}$
2. $V_{sal} = V_{ent}$

Problemas relacionados con los ejemplos

16–1 $\mathbf{Z} = 1.8\text{ k}\Omega + j950\ \Omega$; $\mathbf{Z} = 2.04\angle 27.8°\text{ k}\Omega$
16–2 $\mathbf{I} = 423\angle -32.1°\ \mu\text{A}$
16–3 $Z = 12.6\text{ k}\Omega$; $\theta = 85.5°$
16–4 $\phi = 65.6°$
16–5 V_{sal} se incrementa.
16–6 $\phi = -32°$
16–7 $V_{sal} = 12.3\text{ V rms}$
16–8 $\mathbf{Z} = 8.14\angle 35.5°\text{ k}\Omega$
16–9 $\mathbf{Y} = 3.03\text{ mS} - j0.796\text{ mS}$
16–10 $\mathbf{I} = 14.0\angle -71.1°\text{ mA}$
16–11 $I_{tot} = 67.6\text{ mA}$; $\theta = 36.3°$
16–12 **(a)** $\mathbf{V}_1 = 8.04\angle 2.52°\text{ V}$ **(b)** $\mathbf{V}_2 = 2.00\angle -10.2°\text{ V}$
16–13 $\mathbf{I}_{tot} = 20.2\angle -59.0°\text{ mA}$
16–14 P, Q y S disminuyen.
16–15 Conexión abierta entre L_1 y L_2.

AUTOEVALUACIÓN

1. (f) **2.** (b) **3.** (a) **4.** (d) **5.** (a) **6.** (d) **7.** (b) **8.** (b)
9. (a) **10.** (d) **11.** (c) **12.** (d) **13.** (b) **14.** (c)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (a) **2.** (b) **3.** (b) **4.** (c) **5.** (c) **6.** (c) **7.** (a) **8.** (c)
9. (a) **10.** (b) **11.** (c) **12.** (b) **13.** (a) **14.** (a) **15.** (a) **16.** (b)

17 CIRCUITOS *RLC* Y RESONANCIA

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

PARTE 1: CIRCUITOS EN SERIE
- Determinar la impedancia de un circuito RLC en serie
- Analizar circuitos RLC en serie
- Analizar un circuito en cuanto a resonancia en serie

PARTE 2: CIRCUITOS EN PARALELO
- Determinar la impedancia de un circuito RLC en paralelo
- Analizar circuitos RLC en paralelo
- Analizar un circuito en cuanto a resonancia en paralelo

PARTE 3: CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO
- Analizar circuitos RLC en serie-paralelo

PARTE 4: TEMAS ESPECIALES
- Determinar el ancho de banda de circuitos resonantes
- Examinar algunas aplicaciones de circuitos resonantes

TÉRMINOS CLAVE

- Circuito tanque
- Frecuencia de potencia media
- Frecuencia resonante (f_r)
- Resonancia en paralelo
- Resonancia en serie
- Selectividad

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, se trabajará con el circuito de sintonización resonante en el amplificador de RF de un receptor de radio de AM. El circuito de sintonización se utiliza para seleccionar cualquier frecuencia deseada dentro de la banda de AM de modo que pueda sintonizarse una estación deseada.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se amplían los métodos de análisis aprendidos en los capítulos 15 y 16 hacia la cobertura de circuitos con combinaciones de componentes resistivos, inductivos y capacitivos. Se estudian los circuitos RLC en serie y en paralelo, además de las combinaciones en serie-paralelo.

Los circuitos que tienen tanto inductancia como capacitancia exhiben la propiedad de resonancia, la cual es importante en muchos tipos de aplicaciones. La resonancia es la base de la selectividad de frecuencia en sistemas de comunicaciones. Por ejemplo, la capacidad de un receptor de radio o de televisión para seleccionar cierta frecuencia transmitida por una estación particular y, al mismo tiempo, eliminar las frecuencias de otras estaciones está basada en el principio de resonancia. En este capítulo se abordan las condiciones que producen resonancia en circuitos RLC y las características de los circuitos resonantes.

ALTERNATIVAS DE COBERTURA

Si se elige la alternativa 1 de estudiar todo el capítulo 15 y todo el capítulo 16, entonces este capítulo deberá ser estudiado a continuación en su totalidad.

Si se elige la alternativa 2 de estudiar los circuitos reactivos tratados en los capítulos 15 y 16 con base en las cuatro partes principales, entonces la parte apropiada de este capítulo deberá estudiarse a continuación, seguida por la siguiente parte del capítulo 15, si es aplicable.

Parte 1

CIRCUITOS EN SERIE

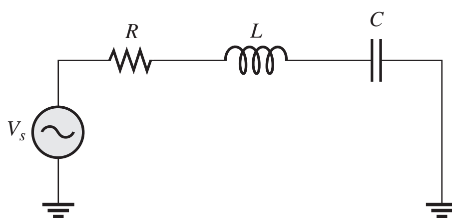
17–1 IMPEDANCIA DE CIRCUITOS *RLC* EN SERIE

Un circuito *RLC* en serie contiene resistencia, inductancia y capacitancia. Como la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva tienen efectos opuestos en el ángulo de fase del circuito, la reactancia total es menor que cualquier reactancia individual.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la impedancia de un circuito *RLC* en serie**
  - Calcular la reactancia total
  - Determinar si un circuito es predominantemente inductivo o capacitivo

En la figura 17-1 se muestra un circuito *RLC* en serie. Este circuito contiene resistencia, inductancia y capacitancia.



◄ FIGURA 17–1

Circuito *RLC* en serie.

Como se sabe, la reactancia inductiva ($\mathbf{X}_L$) causa que la corriente total se retrase con respecto al voltaje aplicado. La reactancia capacitiva ($\mathbf{X}_C$) tiene el efecto opuesto: provoca que la corriente se adelante con respecto al voltaje. Por tanto, $\mathbf{X}_L$ y $\mathbf{X}_C$ tienden a contrarrestarse entre sí. Cuando son iguales, se eliminan y la reactancia total es de cero. En cualquier caso, la magnitud de la reactancia total en el circuito en serie es

$$X_{tot} = |X_L - X_C|$$ **Ecuación 17–1**

El término $|X_L - X_C|$ es el valor absoluto de la diferencia de las dos reactancias. Es decir, el signo del resultado se considera positivo sin que importe cuál reactancia sea más grande. Por ejemplo, $3 - 7 = -4$, pero el valor absoluto es

$$|3 - 7| = 4$$

Cuando $X_L > X_C$, el circuito es predominantemente inductivo, y cuando $X_C > X_L$, el circuito es predominantemente capacitivo.

La impedancia total del circuito *RLC* se establece en forma rectangular en la ecuación 17-2, y en forma polar en la ecuación 17-3.

Ecuación 17–2

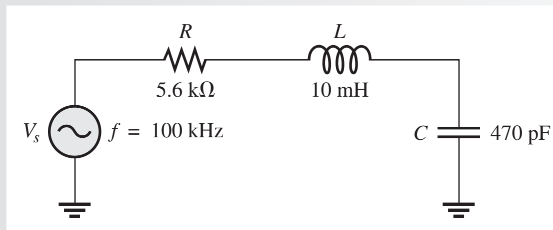
$$\mathbf{Z} = R + jX_L - jX_C$$

Ecuación 17–3

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\angle \pm \tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$

En la ecuación 17-3, $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ es la magnitud y $\tan^{-1}(X_{tot}/R)$ es el ángulo de fase entre la corriente total y el voltaje aplicado. Si el circuito es predominantemente inductivo, el ángulo de fase es positivo; y si es predominantemente capacitivo, el ángulo de fase es negativo.

EJEMPLO 17–1 Para el circuito *RLC* en serie de la figura 17-2, determine la impedancia total. Exprésela en forma tanto rectangular como polar.



▲ **FIGURA 17–2**

Solución Primero, determine X_C y X_L.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(100\text{ kHz})(470\text{ pF})} = 3.39\text{ k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(100\text{ kHz})(10\text{ mH}) = 6.28\text{ k}\Omega$$

En este caso, X_L es mayor que X_C, y por tanto el circuito es más inductivo que capacitivo. La magnitud de la reactancia total es

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |6.28\text{ k}\Omega - 3.39\text{ k}\Omega| = 2.89\text{ k}\Omega \qquad \text{inductivo}$$

La impedancia en forma rectangular es

$$\mathbf{Z} = R + (jX_L - jX_C) = 5.6\text{ k}\Omega + (j6.28\text{ k}\Omega - j3.39\text{ k}\Omega) = \mathbf{5.6\text{ k}\Omega + j2.89\text{ k}\Omega}$$

La impedancia en forma polar es

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(5.6\text{ k}\Omega)^2 + (2.89\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2.89\text{ k}\Omega}{5.6\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{6.30\angle 27.3^\circ\text{ k}\Omega}$$

El ángulo positivo indica que el circuito es inductivo.

Problema relacionado* Determine **Z** en forma polar si *f* se incrementa a 200 kHz.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Como se ha visto, cuando la reactancia inductiva es más grande que la capacitiva, el circuito se muestra inductivo y la corriente se retrasa al voltaje aplicado. Cuando la reactancia capacitiva es más grande, el circuito se muestra capacitivo y la corriente se adelanta al voltaje aplicado.

REPASO DE LA SECCIÓN 17-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. En un circuito *RLC* en serie dado, X_C es de 150 Ω y X_L de 80 Ω. ¿Cuál es la reactancia total en ohms? ¿El circuito es inductivo o capacitivo?
2. Determine la impedancia en forma polar para el circuito de la pregunta 1 cuando $R = 47\ \Omega$. ¿Cuál es la magnitud de la impedancia? ¿Cuál es el ángulo de fase? ¿Se adelanta o retrasa la corriente con respecto al voltaje aplicado?

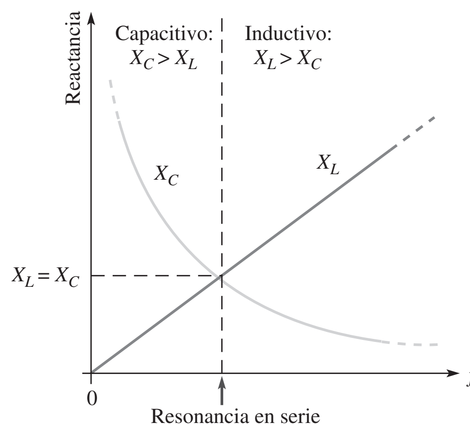
17–2 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RLC* EN SERIE

Recordemos que la reactancia capacitiva varía inversamente con la frecuencia y la reactancia inductiva varía directamente con la frecuencia. En esta sección, se examinan los efectos combinados de las reactancias como una función de la frecuencia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar circuitos *RLC* en serie**
  - Determinar la corriente en un circuito *RLC* en serie
  - Determinar los voltajes en un circuito *RLC* en serie
  - Determinar el ángulo de fase

La figura 17-3 muestra que en un circuito *RLC* en serie típico la impedancia total se comporta como sigue: al empezar a una frecuencia muy baja, X_C es alta, X_L es baja, y el circuito es predominantemente capacitivo. Conforme se incrementa la frecuencia, X_C disminuye y X_L aumenta hasta que se alcanza un valor donde $X_C = X_L$ y las dos reactancias se eliminan, lo cual vuelve al circuito puramente resistivo. Esta condición se denomina **resonancia en serie** y se estudiará en la sección 17-3. A medida que la frecuencia se incrementa aún más, X_L llega a ser mayor que X_C, y el circuito es predominantemente inductivo. El ejemplo 17-2 ilustra cómo cambian la impedancia y el ángulo de fase conforme la frecuencia de la fuente varía.



◀ **FIGURA 17–3**

Cómo varían X_C y X_L con la frecuencia.

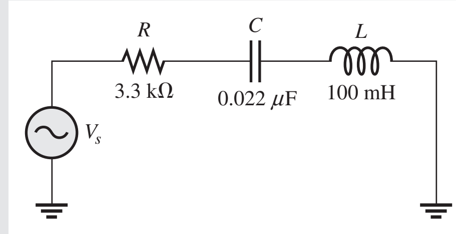
La gráfica de X_L es una línea recta y la gráfica de X_C es una curva, como se muestra en la figura 17-3. La ecuación general de una línea recta es $y = mx + b$, donde m es la pendiente de la línea y b es el punto de intersección del eje y. La fórmula $X_L = 2\pi fL$ se ajusta a esta fórmula general de la línea recta, donde $y = X_L$ (una variable), $m = 2\pi L$ (una constante), $x = f$ (una variable), y $b = 0$ como sigue: $X_L = 2\pi Lf + 0$.

La curva X_C se llama *hipérbola*, y su ecuación general es $xy = k$. La ecuación de capacitancia reactiva, $X_C = 1/2\pi fC$, puede ser reordenada como $X_C f = 1/2\pi C$, donde $x = X_C$ (una variable), $y = f$ (una variable), y $k = 1/2\pi C$ (una constante).

EJEMPLO 17–2 Con cada una de las siguientes frecuencias de entrada, encuentre la impedancia en forma polar para el circuito de la figura 17-4. Observe los cambios en magnitud y ángulo de fase con la frecuencia.

(a) $f = 1\text{ kHz}$ **(b)** $f = 2\text{ kHz}$ **(c)** $f = 3.5\text{ kHz}$ **(d)** $f = 5\text{ kHz}$

▶ **FIGURA 17–4**



Solución **(a)** Con $f = 1$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 7.23\text{ k}\Omega$$
$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(1\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 628\ \Omega$$

El circuito es claramente capacitivo, y la impedancia es

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$
$$= \sqrt{(3.3\text{ k}\Omega)^2 + (628\ \Omega - 7.23\text{ k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{6.60\text{ k}\Omega}{3.3\text{ k}\Omega}\right) = \mathbf{7.38\angle -63.4^\circ\ k\Omega}$$

El signo negativo del ángulo se utiliza para indicar que el circuito es capacitivo.

(b) Con $f = 2$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(2\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 3.62\text{ k}\Omega$$
$$X_L = 2\pi(2\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 1.26\text{ k}\Omega$$

El circuito sigue siendo capacitivo, y la impedancia es

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(3.3\text{ k}\Omega)^2 + (1.26\text{ k}\Omega - 3.62\text{ k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{2.36\text{ k}\Omega}{3.3\text{ k}\Omega}\right)$$
$$= \mathbf{4.06\angle -35.6^\circ\ k\Omega}$$

(c) Con $f = 3.5$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(3.5\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 2.07\text{ k}\Omega$$
$$X_L = 2\pi(3.5\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 2.20\text{ k}\Omega$$

El circuito es casi puramente resistivo porque X_C y X_L son casi iguales, pero es un poco inductivo. La impedancia es

$$\mathbf{Z} = \sqrt{(3.3\text{ k}\Omega)^2 + (2.20\text{ k}\Omega - 2.07\text{ k}\Omega)^2}\angle \tan^{-1}\left(\frac{0.13\text{ k}\Omega}{3.3\text{ k}\Omega}\right)$$
$$= \mathbf{3.3\angle 2.26^\circ\ k\Omega}$$

(d) Con $f = 5$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(5\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 1.45\text{ k}\Omega$$
$$X_L = 2\pi(5\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 3.14\text{ k}\Omega$$

Ahora el circuito es predominantemente inductivo. La impedancia es

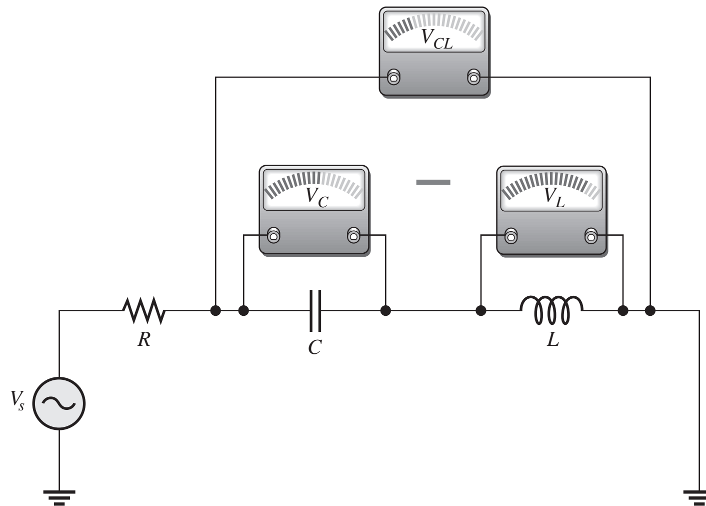
$$\mathbf{Z} = \sqrt{(3.3\text{ k}\Omega)^2 + (3.14\text{ k}\Omega - 1.45\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{1.69\text{ k}\Omega}{3.3\text{ k}\Omega}\right)$$

$$= \mathbf{3.71\angle 27.1^\circ\ k\Omega}$$

Advierta cómo cambia el circuito de capacitivo a inductivo conforme aumenta la frecuencia. La condición de fase cambió de corriente adelantada a corriente retrasada como lo indica el signo del ángulo. Observe que la magnitud de la impedancia se redujo hasta un mínimo que es igual a la resistencia y luego comenzó a incrementarse de nuevo. Asimismo, observe que el ángulo de fase negativo disminuyó al incrementarse la frecuencia y se volvió positivo cuando el circuito se volvió inductivo, incrementándose entonces al aumentar la frecuencia.

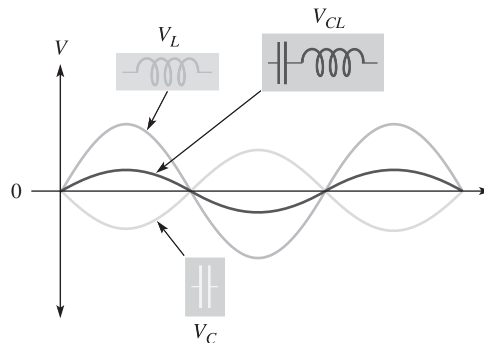
Problema relacionado Determine **Z** en forma polar con $f = 7$ kHz y trace una gráfica de impedancia en función de la frecuencia utilizando los valores dados en este ejemplo.

En un circuito *RLC* en serie, el voltaje entre las terminales del capacitor y entre las terminales del inductor siempre están desfasados entre sí por 180°. Por esa razón, V_C y V_L se restan entre sí, y por tanto el voltaje de *L* y *C* combinados siempre es menor que el voltaje individual más grande que pueda haber entre las terminales de uno u otro componente, tal como ilustran la figura 17-5 y el diagrama de forma de onda de la figura 17-6.



◀ **FIGURA 17–5**

El voltaje en la combinación en serie de *C* y *L* siempre es menor que el voltaje individual más grande presente entre las terminales de *C* o de *L*.

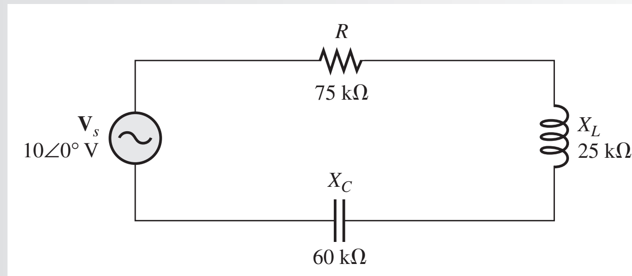


◀ **FIGURA 17–6**

V_{CL} es la suma algebraica de V_L y V_C. Debido a la relación de fase, V_L y V_C efectivamente se restan.

En el ejemplo siguiente, se utiliza la ley de Ohm para determinar la corriente y los voltajes en un circuito *RLC* en serie.

EJEMPLO 17–3 Determine la corriente y los voltajes de cada componente mostrado en la figura 17-7. Exprese cada cantidad en forma polar y trace un diagrama fasorial completo de los voltajes.



▲ FIGURA 17–7

Solución Primero, determine la impedancia total.

$$\mathbf{Z} = R + jX_L - jX_C = 75\text{ k}\Omega + j25\text{ k}\Omega - j60\text{ k}\Omega = 75\text{ k}\Omega - j35\text{ k}\Omega$$

Por conveniencia, convierta a forma polar aplicando la ley de Ohm.

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(75\text{ k}\Omega)^2 + (35\text{ k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{35\text{ k}\Omega}{75\text{ k}\Omega}\right) = 82.8\angle -25^\circ\text{ k}\Omega$$

donde $X_{tot} = |X_L - X_C|$.

Aplique la ley de Ohm para determinar la corriente.

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}} = \frac{10\angle 0^\circ\text{ V}}{82.8\angle -25^\circ\text{ k}\Omega} = \mathbf{121\angle 25.0^\circ\ \mu A}$$

Ahora, aplique la ley de Ohm para determinar los voltajes entre las terminales de R, L y C.

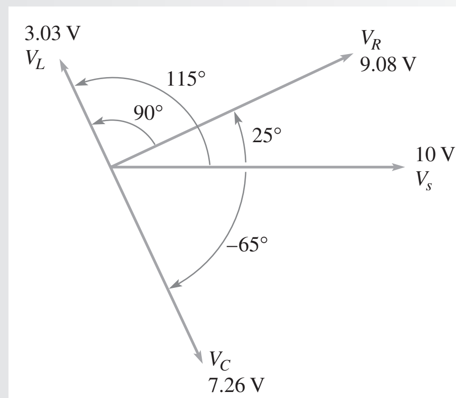
$$\mathbf{V}_R = \mathbf{IR} = (121\angle 25.0^\circ\ \mu\text{A})(75\angle 0^\circ\text{ k}\Omega) = \mathbf{9.08\angle 25.0^\circ\ V}$$

$$\mathbf{V}_L = \mathbf{IX}_L = (121\angle 25.0^\circ\ \mu\text{A})(25\angle 90^\circ\text{ k}\Omega) = \mathbf{3.03\angle 115^\circ\ V}$$

$$\mathbf{V}_C = \mathbf{IX}_C = (121\angle 25.0^\circ\ \mu\text{A})(60\angle -90^\circ\text{ k}\Omega) = \mathbf{7.26\angle -65.0^\circ\ V}$$

El diagrama fasorial aparece en la figura 17-8. Las magnitudes representan valores rms. Observe que V_L adelanta en 90° a V_R, y V_C está retrasado 90° con respecto a V_R. Asimismo, existe una diferencia de fase de 180° entre V_L y V_C. Si el fasor de corriente se mostrara, apa-

▶ FIGURA 17–8



recería con el mismo ángulo que V_R. La corriente adelanta en 25° a V_s, que es el voltaje de fuente, lo cual indica la presencia de un circuito capacitivo ($X_C > X_L$). El diagrama fasorial gira 25° a partir de su posición usual porque la referencia es el voltaje de fuente, V_s, el cual se muestra orientado a lo largo del eje x.

Problema relacionado En la figura 17-7, ¿qué le sucederá a la corriente conforme la frecuencia del voltaje de fuente se incremente?

REPASO DE LA SECCIÓN 17-2

1. **Los siguientes voltajes ocurren en cierto circuito *RLC* en serie. Determine el voltaje de fuente: $\mathbf{V}_R = 24 \angle 30°$ V, $\mathbf{V}_L = 15 \angle 120°$ V, y $\mathbf{V}_C = 45 \angle -60°$ V.**
2. **Cuando $R = 1.0$ kΩ, $X_C = 1.8$ kΩ y $X_L = 1.2$ kΩ, ¿se adelanta o retrasa la corriente con respecto al voltaje aplicado?**
3. **Determine la reactancia total en la pregunta 2.**

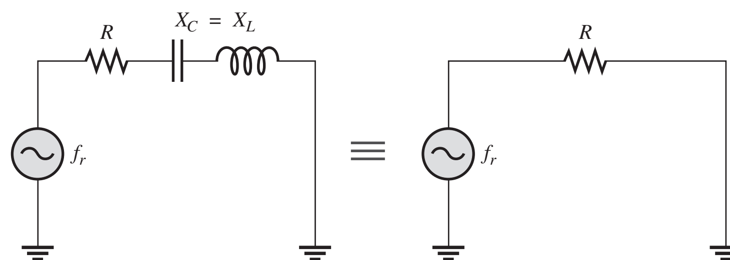
17–3 RESONANCIA EN SERIE

En un circuito *RLC* en serie, la resonancia en serie ocurre cuando $X_C = X_L$. La frecuencia a la cual tiene lugar la resonancia se llama **frecuencia resonante** y se designa mediante f_r.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un circuito en cuanto a resonancia en serie**
  - Definir el témino *resonancia en serie*
  - Determinar la impedancia en resonancia
  - Explicar por qué las reactancias se cancelan bajo condiciones de resonancia
  - Determinar la frecuencia resonante en serie
  - Calcular la corriente, el voltaje y el ángulo de fase en condiciones de resonancia

La figura 17-9 ilustra la condición resonante en serie.



◀ **FIGURA 17–9**

Resonancia en serie. X_C y X_L se eliminan entre sí y el resultado es un circuito puramente resistivo.

En un circuito *RLC* en serie, la **resonancia** es una condición en la cual las reactancias capacitiva e inductiva son iguales en magnitud; por tanto, se eliminan entre sí y el resultado es una impedancia puramente resistiva. Para un circuito *RLC* en serie, la impedancia total fue establecida en la ecuación 17-2 como

$$\mathbf{Z} = R + jX_L - jX_C$$

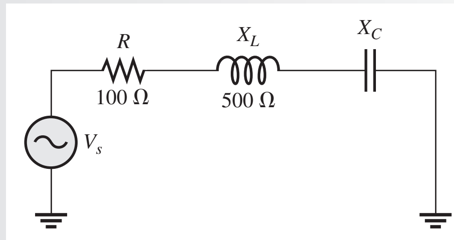
En condición resonante, $X_L = X_C$ y los términos j se eliminan; por tanto, la impedancia es puramente resistiva. Estas condiciones resonantes se establecen en las siguientes ecuaciones:

$$X_L = X_C$$

$$Z_r = R$$

EJEMPLO 17–4 Para el circuito *RLC* en serie de la figura 17-10, determine $\mathbf{X_C}$ y Z en condición de resonancia.

▶ **FIGURA 17–10**



Solución $X_L = X_C$ en frecuencia resonante. Por tanto, $X_C = X_L = \mathbf{500\ \Omega}$. En condición resonante la impedancia es

$$\mathbf{Z}_r = R + jX_L - jX_C = 100\ \Omega + j500\ \Omega - j500\ \Omega = \mathbf{100\angle 0°\ \Omega}$$

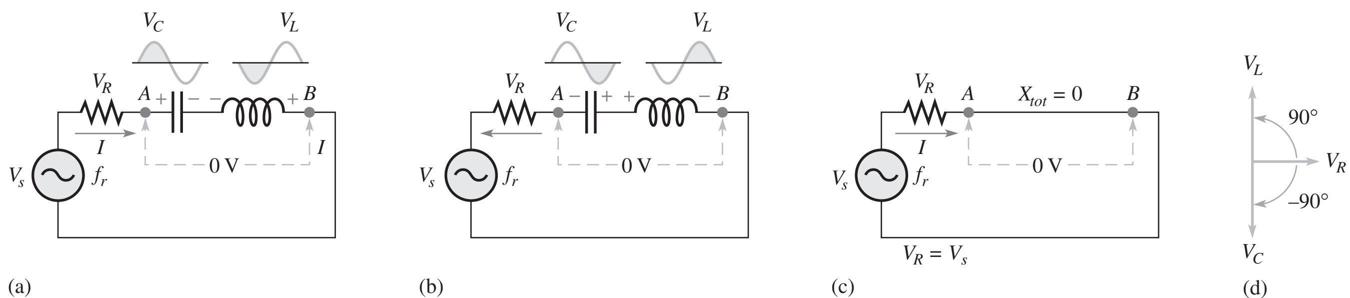
Esto muestra que bajo condiciones de resonancia la impedancia es igual a la resistencia porque las reactancias son iguales en magnitud y, por consiguiente, se cancelan.

Problema relacionado Justo por debajo de la frecuencia resonante, ¿el circuito es más inductivo o más capacitivo?

X_L y X_C se cancelan en condición de resonancia

En la frecuencia resonante en serie (f_r), los voltajes entre las terminales de C y L son iguales en magnitud porque las reactancias son iguales. Fluye la misma corriente a través de ambos componentes porque están en serie ($IX_C = IX_L$). Además, V_L y V_C están desfasados siempre en 180° entre sí.

Durante cualquier ciclo dado, las polaridades de los voltajes en C y L son opuestas, como se muestra en las partes (a) y (b) de la figura 17-11. Los voltajes iguales y opuestos entre las terminales de C y L se cancelan y quedan cero volts del punto A al punto B como se muestra. Puesto que no hay caída de voltaje de A a B pero sigue habiendo corriente, la reactancia total debe ser de cero, según indica la parte (c). También, el diagrama fasorial de voltaje en la parte (d) muestra que V_C y V_L son iguales en magnitud y están desfasados por 180° entre sí.



▲ **FIGURA 17–11**

A la frecuencia resonante, fr, los voltajes entre *C* y *L* son iguales en magnitud. Como están desfasados en 180° entre sí, se eliminan, y el voltaje es de 0 V en la combinación *LC* (punto *A* a punto *B*). La sección del circuito desde *A* hasta *B* tiene, efectivamente, aspecto de un corto en resonancia.

Frecuencia resonante en serie

Para un circuito *RLC* en serie dado, la resonancia ocurre a sólo una frecuencia específica. Una fórmula para esta frecuencia resonante se desarrolla como sigue:

$$X_L = X_C$$

Sustitúyanse las fórmulas de reactancia.

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

Luego, multiplicando ambos miembros por $f_r/2\pi L$,

$$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

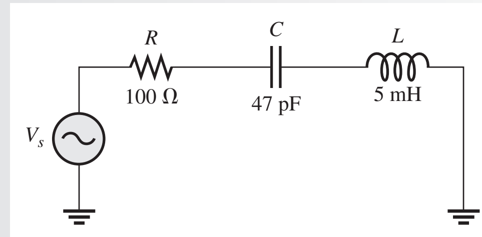
Se toma la raíz cuadrada de ambos miembros. La fórmula para frecuencia resonante en serie es

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ecuación 17–4

EJEMPLO 17–5 Encuentre la frecuencia resonante en serie para el circuito de la figura 17-12.

▶ **FIGURA 17–12**



Solución La frecuencia resonante es

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(5\text{ mH})(47\text{ pF})}} = \mathbf{328\text{ kHz}}$$

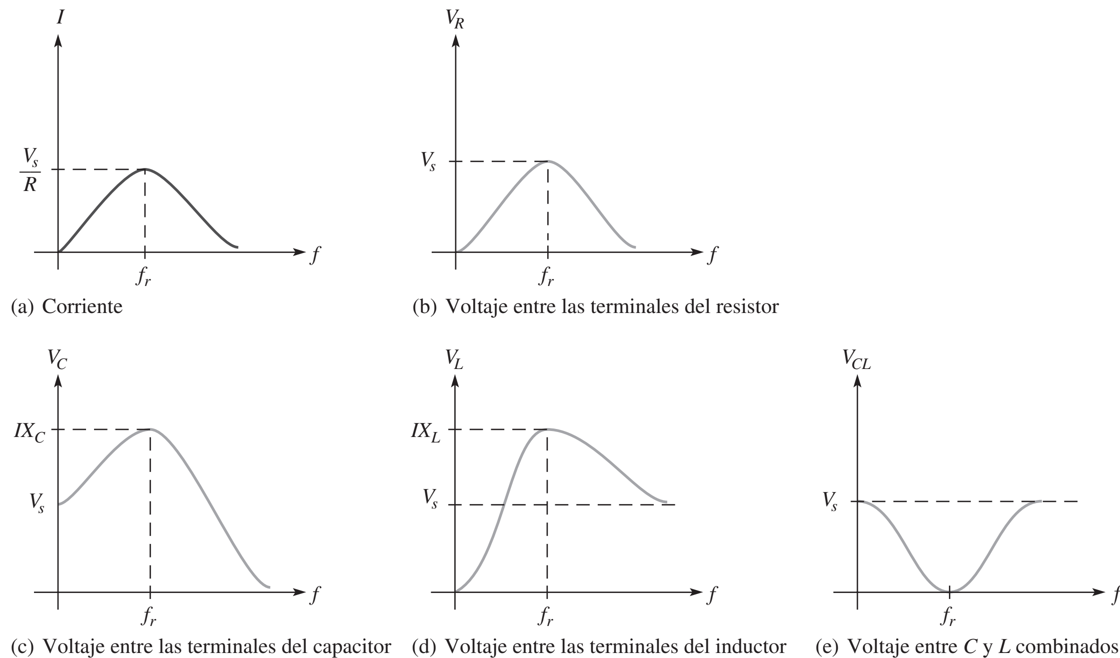
Problema relacionado Si $C = 0.01\ \mu$F en la figura 17-12, ¿cuál es la frecuencia resonante?



Use el archivo Multisim E17-05 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Corriente y voltajes en un circuito RLC en serie

En la frecuencia resonante en serie, la corriente es máxima ($I_{máx} = V_s/R$). Por encima y por debajo de la condición de resonancia, la corriente disminuye porque la impedancia se incrementa. Una curva de respuesta que muestra la gráfica de corriente en función de la frecuencia aparece en la figura 17-13(a). El voltaje entre las terminales del resistor, V_R, sigue a la corriente y es máximo (igual a V_s) en condición de resonancia y de cero cuando $f = 0$ y cuando $f = \infty$, como se indica en la figura 17-13(b). Las configuraciones generales de las curvas V_C y V_L aparecen en las figuras 17-13(c) y (d). Advierta que $V_C = V_s$ cuando $f = 0$, porque la capacitancia aparece abierta. Observe además que V_L tiende a V_s conforme f tiende a infinito, porque el inductor aparece abierto. El voltaje en la combinación de C y L disminuye conforme aumenta la frecuencia por debajo de la condición de resonancia, alcanzando un mínimo de cero en la frecuencia de resonancia; luego este voltaje se incrementa por arriba de la frecuencia de resonancia según muestra la figura 17-13(e).



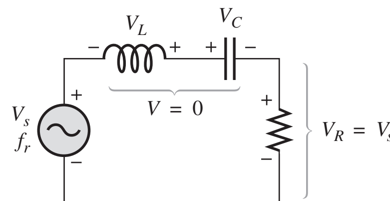
▲ **FIGURA 17–13**

Magnitudes generalizadas de corriente y voltaje como una función de la frecuencia en un circuito *RLC* en serie. V_C y V_L pueden ser mucho más grandes que el voltaje de fuente. Las configuraciones de las gráficas dependen de los valores específicos del circuito.

Los voltajes son máximos en condición de resonancia, pero disminuyen por encima y por debajo de f_r. Los voltajes en L y C en condición de resonancia son exactamente iguales en magnitud pero desfasados por 180°, de modo que se cancelan. Por tanto, el voltaje total en L y en C es de cero, y $V_R = V_s$ en condición de resonancia, como indica la figura 17-14. Individualmente, V_L y V_C pueden ser mucho más grandes que el voltaje de fuente, según veremos más adelante. Tenga en cuenta que V_L y V_C siempre son de polaridades opuestas sin importar la frecuencia, pero sólo en condición de resonancia sus magnitudes son iguales.

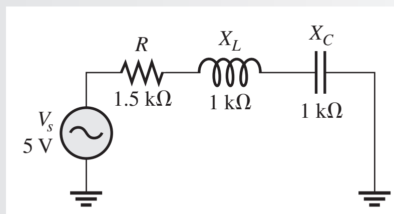
▶ **FIGURA 17–14**

Circuito *RLC* en serie en resonancia.



EJEMPLO 17–6 Determine I, V_R, V_L y V_C en condición de resonancia para el circuito de la figura 17-15. Se muestran los valores resonantes de X_L y X_C.

▶ **FIGURA 17–15**



Solución En resonancia, I es máxima e igual a V_s/R.

$$I = \frac{V_s}{R} = \frac{5\text{ V}}{1.5\text{ k}\Omega} = \mathbf{3.33\text{ mA}}$$

Aplique la ley de Ohm para obtener las magnitudes de los voltajes.

$$V_R = IR = (3.33\text{ mA})(2.2\text{ k}\Omega) = \mathbf{7.33\text{ V}}$$
$$V_L = IX_L = (3.33\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = \mathbf{3.33\text{ V}}$$
$$V_C = IX_C = (3.33\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = \mathbf{3.33\text{ V}}$$

Observe que todo el voltaje de fuente decae a través del resistor. Además, V_L y V_C son iguales en magnitud pero opuestos en fase. Esto causa que los voltajes se cancelen, propiciando que el voltaje reactivo total sea de cero.

Problema relacionado ¿Cuál es el ángulo de fase si la frecuencia se duplica?

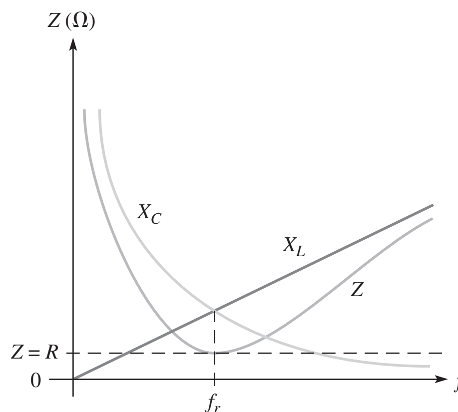


Use el archivo Multisim E17-06 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Impedancia *RLC* en serie

A frecuencias por debajo de f_r, $X_C > X_L$; así, el circuito es capacitivo. A la frecuencia resonante, $X_C = X_L$, de modo que el circuito es puramente resistivo. A frecuencias por encima de f_r, $X_L > X_C$; por tanto, el circuito es inductivo.

La magnitud de la impedancia es mínima en resonancia ($Z = R$) y su valor aumenta por encima y por debajo del punto resonante. La gráfica de la figura 17-16 ilustra cómo cambia la impedancia con la frecuencia. A frecuencia de cero, tanto X_C como Z son infinitamente grandes y X_L tiene valor de cero porque el capacitor se comporta como una abertura a 0 Hz y el inductor se comporta como un corto. Conforme se incrementa la frecuencia, X_C disminuye y X_L aumenta. Como X_C es más grande que X_L a frecuencias por debajo de f_r, Z disminuye junto con X_C. A f_r, $X_C = X_L$ y $Z = R$. A frecuencias por encima de f_r, X_L se vuelve cada vez más grande que X_C, lo cual propicia que Z aumente.

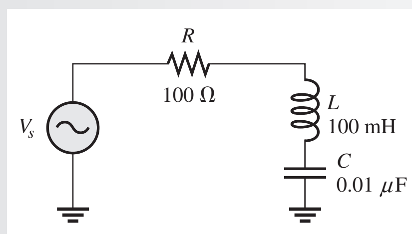


◀ **FIGURA 17–16**

Impedancia *RLC* en serie como una función de la frecuencia.

EJEMPLO 17–7 Para el circuito de la figura 17-17, determine la magnitud de la impedancia a las siguientes frecuencias:

(a) f_r **(b)** 1000 Hz por debajo de f_r **(c)** 1000 Hz por encima de f_r



▲ **FIGURA 17–17**

Solución **(a)** A f_r, la impedancia es igual a R.

$$Z = R = \mathbf{100\ \Omega}$$

Para determinar la impedancia por encima y por debajo de f_r, calcule primero la frecuencia resonante.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100\text{ mH})(0.01\ \mu\text{F})}} = 5.03\text{ kHz}$$

(b) A 1000 Hz por debajo de f_r, la frecuencia y las reactancias son como sigue:

$$f = f_r - 1\text{ kHz} = 5.03\text{ kHz} - 1\text{ kHz} = 4.03\text{ kHz}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(4.03\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 3.95\text{ k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(4.03\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 2.53\text{ k}\Omega$$

Por consiguiente, la impedancia a $f_r - 1$ kHz es

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(100\ \Omega)^2 + (2.53\text{ k}\Omega - 3.95\text{ k}\Omega)^2} = \mathbf{1.42\ k\Omega}$$

(c) A 1000 Hz por encima de f_r,

$$f = 5.03\text{ kHz} + 1\text{ kHz} = 6.03\text{ kHz}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi(6.03\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 2.64\text{ k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi(6.03\text{ kHz})(100\text{ mH}) = 3.79\text{ k}\Omega$$

Por consiguiente, la impedancia a $f_r + 1$ kHz es

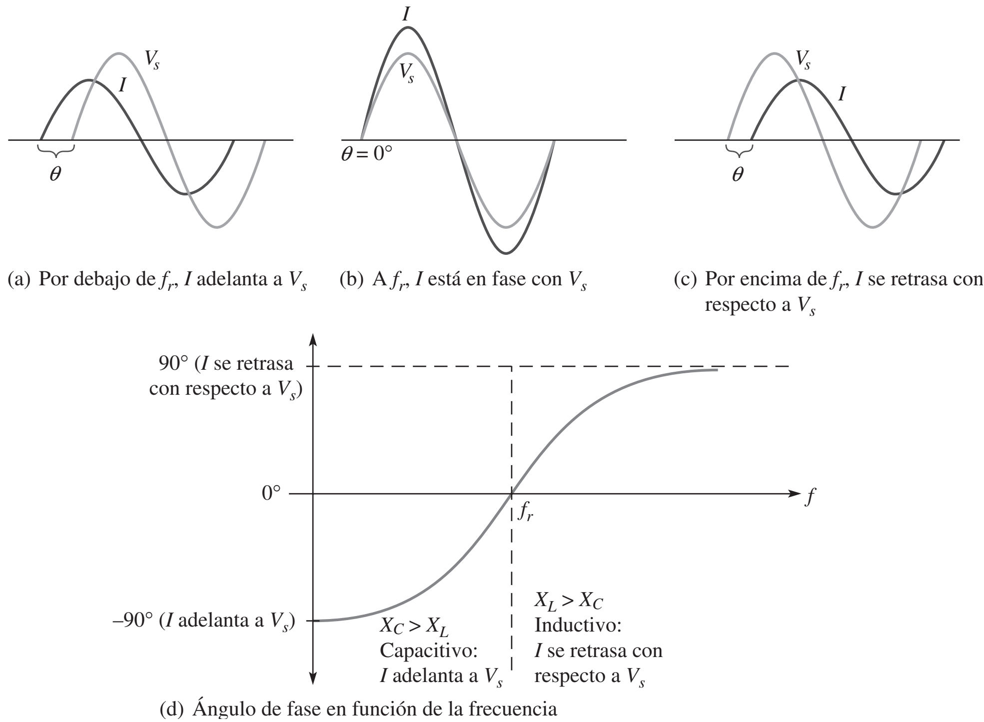
$$Z = \sqrt{(100\ \Omega)^2 + (3.79\text{ k}\Omega - 2.64\text{ k}\Omega)^2} = \mathbf{1.15\ k\Omega}$$

En la parte (b) Z es capacitiva y en (c) es inductiva.

Problema relacionado ¿Qué le sucede a la magnitud de la impedancia si f disminuye por debajo de 4.03 kHz? ¿Por encima de 6.03 kHz?

El ángulo de fase de un circuito *RLC* en serie

A frecuencias por debajo de la frecuencia de resonancia $X_C > X_L$, y la corriente adelanta al voltaje de fuente, como indica la figura 17-18(a). El ángulo de fase disminuye conforme la frecuencia se aproxima al valor resonante y es de 0° en condición de resonancia, según muestra la parte (b). A frecuencias por encima de la frecuencia de resonancia $X_L > X_C$, y la corriente se retrasa con respecto al voltaje de fuente, como ilustra la parte (c). Conforme se eleva la frecuencia, el ángulo de fase se aproxima a 90°. En la parte (d) de la figura aparece una gráfica del ángulo de fase en función de la frecuencia.



(a) Por debajo de f_r, I adelanta a V_s (b) A f_r, I está en fase con V_s (c) Por encima de f_r, I se retrasa con respecto a V_s

(d) Ángulo de fase en función de la frecuencia

▲ **FIGURA 17–18**

Ángulo de fase como una función de la frecuencia en un circuito *RLC* en serie.

REPASO DE LA SECCIÓN 17-3

1. ¿Cuál es la condición para que haya resonancia en serie?
2. ¿Por qué la corriente es máxima en la frecuencia resonante?
3. Calcule la frecuencia resonante con $C = 1000$ pF y $L = 1000\ \mu$H.
4. En la pregunta 3, ¿ el circuito es inductivo o capacitivo a 50 kHz?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

Esto completa la cobertura de circuitos reactivos en serie. La cobertura de circuitos reactivos en paralelo comienza en el capítulo 15, parte 2, en la página 626.

Parte 2

CIRCUITOS EN PARALELO

17–4 IMPEDANCIA DE CIRCUITOS *RLC* EN PARALELO

En esta sección, se estudiará la impedancia y el ángulo de fase de un circuito *RLC* dispuesto en paralelo. Conductancia, susceptancia y admitancia de un circuito *RLC* en paralelo también son abordadas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar la impedancia de un circuito *RLC* en paralelo**
  - Calcular conductancia, susceptancia y admitancia
  - Determinar si un circuito es predominantemente inductivo o capacitivo

La figura 17-19 muestra un circuito *RLC* dispuesto en paralelo. La impedancia total se calcula utilizando el método delrecíproco de la suma de recíprocos, exactamente como se hizo para circuitos con resistores en paralelo.

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} + \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} + \frac{1}{X_C\angle -90^\circ}$$

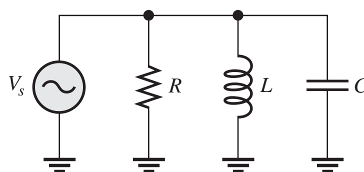
o

Ecuación 17–5

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{\dfrac{1}{R\angle 0^\circ} + \dfrac{1}{X_L\angle 90^\circ} + \dfrac{1}{X_C\angle -90^\circ}}$$

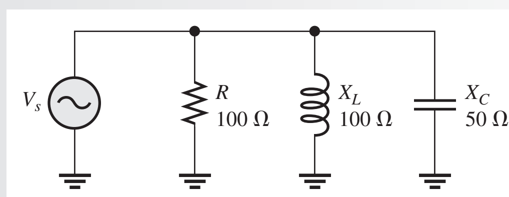
▶ FIGURA 17–19

Circuito *RLC* en paralelo.



EJEMPLO 17–8 Determine **Z** en forma polar para el circuito *RLC* en paralelo de la figura 17-20.

▶ FIGURA 17–20



Solución Use la fórmula de la suma de recíprocos.

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} + \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} + \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} = \frac{1}{100\angle 0^\circ\ \Omega} + \frac{1}{100\angle 90^\circ\ \Omega} + \frac{1}{50\angle -90^\circ\ \Omega}$$

Aplique la regla para la división de números polares.

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = 10\angle 0^\circ\ \text{mS} + 10\angle -90^\circ\ \text{mS} + 20\angle 90^\circ\ \text{mS}$$

Recuerde que en el denominador el signo del ángulo cambia cuando se divide.

A continuación, convierta cada término en su equivalente rectangular y combine.

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = 10\ \text{mS} - j10\ \text{mS} + j20\ \text{mS} = 10\ \text{mS} + j10\ \text{mS}$$

Tome el recíproco para obtener **Z** y luego convierta a forma polar.

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{10\ \text{mS} + j10\ \text{mS}} = \frac{1}{\sqrt{(10\ \text{mS})^2 + (10\ \text{mS})^2}\angle \tan^{-1}\left(\frac{10\ \text{mS}}{10\ \text{mS}}\right)}$$

$$= \frac{1}{14.14\angle 45^\circ\ \text{mS}} = \mathbf{70.7\angle -45^\circ\ \Omega}$$

El ángulo negativo indica que el circuito es capacitivo. Esto puede resultar sorpresivo porque $X_L > X_C$. Sin embargo, en un circuito en paralelo, la cantidad más pequeña tiene el efecto más grande en la corriente total porque su corriente es máxima. Similar al caso de resistencias en paralelo, la reactancia menor atrae más corriente y tiene el mayor efecto en la Z total.

En este circuito, la corriente total adelanta en 45° al voltaje total.

Problema relacionado Si en la figura 17-20 se incrementa la frecuencia, ¿la impedancia aumenta o disminuye?

Conductancia, susceptancia y admitancia

Los conceptos de conductancia (G), susceptancia capacitiva (B_C), susceptancia inductiva (B_L), y admitancia (Y) fueron analizados en los capítulos 15 y 16. Las fórmulas fasoriales se vuelven a establecer aquí.

$$\mathbf{G} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} = G\angle 0^\circ$$ **Ecuación 17–6**

$$\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} = B_C\angle 90^\circ = jB_C$$ **Ecuación 17–7**

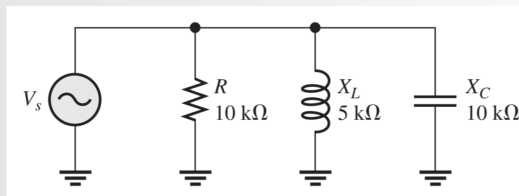
$$\mathbf{B}_L = \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} = B_L\angle -90^\circ = -jB_L$$ **Ecuación 17–8**

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle \pm\theta} = Y\angle \mp\theta = G + jB_C - jB_L$$ **Ecuación 17–9**

Como ya usted sabe, la unidad de medida para estas cantidades es el siemens (S).

EJEMPLO 17–9 Para el circuito *RLC* de la figura 17-21, determine la conductancia, la susceptancia capacitiva, la susceptancia inductiva, y la admitancia total. También, encuentre la impedancia.

▶ FIGURA 17–21



Solución

$$\mathbf{G} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} = \frac{1}{10\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega} = \mathbf{100\angle 0^\circ\ \mu S}$$

$$\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} = \frac{1}{10\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega} = \mathbf{100\angle 90^\circ\ \mu S}$$

$$\mathbf{B}_L = \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} = \frac{1}{5\angle 90^\circ\ \text{k}\Omega} = \mathbf{200\angle -90^\circ\ \mu S}$$

$$\mathbf{Y}_{tot} = G + jB_C - jB_L = 100\ \mu\text{S} + j100\ \mu\text{S} - j200\ \mu\text{S}$$
$$= 100\ \mu\text{S} - j100\ \mu\text{S} = \mathbf{141.4\angle -45^\circ\ \mu S}$$

A partir de $\mathbf{Y}_{tot}$, es posible determinar $\mathbf{Z}_{tot}$.

$$\mathbf{Z}_{tot} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{tot}} = \frac{1}{141.4\angle -45^\circ\ \mu\text{S}} = \mathbf{7.07\angle 45^\circ\ k\Omega}$$

Problema relacionado ¿El circuito de la figura 17-21 es predominantemente inductivo o predominantemente capacitivo?

REPASO DE LA SECCIÓN 17-4

1. En cierto circuito *RLC* en paralelo, la reactancia capacitiva es de 60 Ω y la reactancia inductiva de 100 Ω, ¿el circuito es predominantemente capacitivo o inductivo?
2. Determine la admitancia de un circuito en paralelo en el cual $R = 1.0$ kΩ, $X_C = 500$ Ω, y $X_L = 1.2$ kΩ.
3. En la pregunta 2, ¿cuál es la impedancia?

17–5 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RLC* EN PARALELO

Como ya se vio, en un circuito en paralelo domina la reactancia más pequeña porque produce la mayor corriente de rama.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

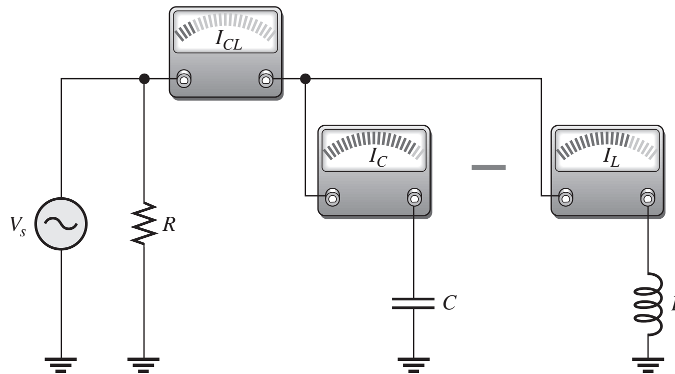
- **Analizar circuitos *RLC* en paralelo**
  - Explicar cómo se relacionan las corrientes en función de la fase
  - Calcular impedancia, corrientes y voltajes

Recordemos que la reactancia capacitiva varía inversamente con la frecuencia, y que la reactancia inductiva varía directamente con la frecuencia. En circuitos *RLC* en paralelo a frecuencias bajas, la reactancia inductiva es menor que la reactancia capacitiva; por consiguiente, el circuito es inductivo. Conforme se incrementa la frecuencia, X_L aumenta y X_C disminuye hasta alcanzar

un valor donde $X_L = X_C$. Éste es el punto de **resonancia en paralelo**. A medida que la frecuencia aumenta un poco más, X_C se vuelve más pequeña que X_L, y el circuito se vuelve capacitivo.

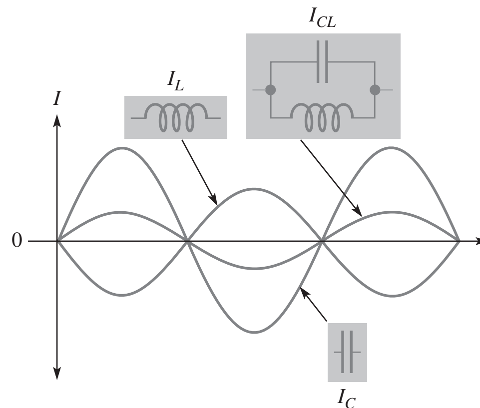
Relaciones de corriente

En un circuito *RLC* dispuesto en paralelo, las corrientes que circulan por las ramas capacitiva e inductiva *siempre* están desfasadas en 180° entre sí (omitiendo cualquier resistencia de bobina). Como I_C e I_L se suman algebraicamente, la corriente total es en realidad la diferencia de sus magnitudes. Por tanto, la corriente total que entra a las ramas de L y C en paralelo siempre es menor que la corriente de rama individual más grande, como ilustra la figura 17-22 y el diagrama de forma de onda de la figura 17-23. Desde luego, la corriente que circula en la rama resistiva siempre está desfasada en 90° con respecto a ambas corrientes reactivas, según muestra el diagrama fasorial de la figura 17-24.



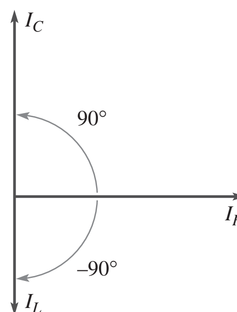
▲ **FIGURA 17–22**

La corriente total que fluye por la combinación en paralelo de *C* y *L* es la diferencia de las dos corrientes de rama.



◀ **FIGURA 17–23**

I_C y I_L se restan efectivamente.



◀ **FIGURA 17–24**

Diagrama fasorial de corriente típico para un circuito *RLC* en paralelo.

La corriente total se expresa como

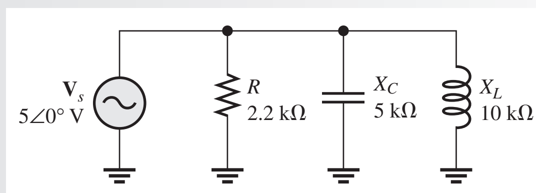
Ecuación 17–10

$$\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right)$$

donde I_{CL} es $I_C - I_L$, la corriente total que fluye por las ramas L y C.

EJEMPLO 17–10 Para el circuito de la figura 17-25, determine cada corriente de rama y la corriente total. Trace un diagrama de su relación.

▶ **FIGURA 17–25**



Solución Use la ley de Ohm para determinar cada corriente de rama en forma fasorial.

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{R}} = \frac{5\angle 0^\circ\text{ V}}{2.2\angle 0^\circ\text{ k}\Omega} = \mathbf{2.27\angle 0^\circ\text{ mA}}$$

$$\mathbf{I}_C = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{X}_C} = \frac{5\angle 0^\circ\text{ V}}{5\angle -90^\circ\text{ k}\Omega} = \mathbf{1\angle 90^\circ\text{ mA}}$$

$$\mathbf{I}_L = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{X}_L} = \frac{5\angle 0^\circ\text{ V}}{10\angle 90^\circ\text{ k}\Omega} = \mathbf{0.5\angle -90^\circ\text{ mA}}$$

La corriente total es la suma fasorial de las corrientes de rama. Según la ley de Kirchhoff,

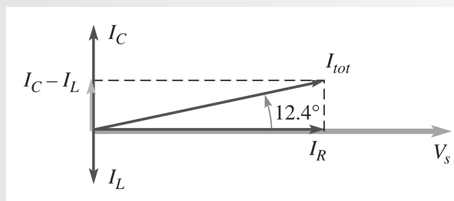
$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{tot} &= \mathbf{I}_R + \mathbf{I}_C + \mathbf{I}_L\\ &= 2.27\angle 0^\circ\text{ mA} + 1\angle 90^\circ\text{ mA} + 0.5\angle -90^\circ\text{ mA}\\ &= 2.27\text{ mA} + j1\text{ mA} - j0.5\text{ mA} = 2.27\text{ mA} + j0.5\text{ mA}\end{aligned}$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{tot} &= \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right)\\ &= \sqrt{(2.27\text{ mA})^2 + (0.5\text{ mA})^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{0.5\text{ mA}}{2.27\text{ mA}}\right) = \mathbf{2.32\angle 12.4^\circ\text{ mA}}\end{aligned}$$

La corriente total es de 2.32 mA adelantada en 12.4° a V_s. La figura 17-26 es el diagrama fasorial de corriente para el circuito.

▶ **FIGURA 17–26**



Problema relacionado Si la frecuencia mostrada en la figura 17-25 aumenta, ¿la corriente total se incrementará o reducirá?

REPASO DE LA SECCIÓN 17-5

1. En un circuito de tres ramas dispuesto en paralelo, $R = 150\ \Omega$, $X_C = 100\ \Omega$, y $X_L = 50\ \Omega$. Determine la corriente en cada rama cuando $V_s = 12$ V.
2. La impedancia de un circuito *RLC* en paralelo es de $2.8 \angle -38.9°$ kΩ. ¿El circuito es capacitivo o inductivo?

17–6 RESONANCIA EN PARALELO

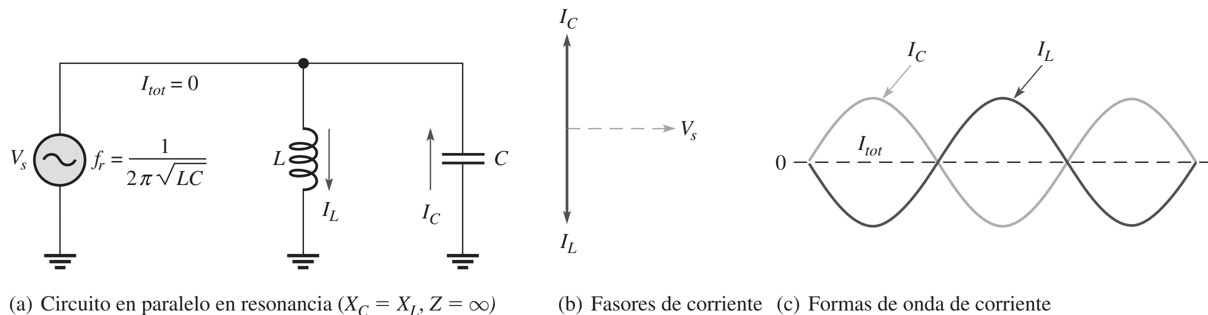
En esta sección, se considerará primero la condición resonante de un circuito *LC* ideal (sin resistencia de devanado) dispuesto en paralelo. Luego, se examinará el caso más realista en que la resistencia de la bobina se toma en cuenta.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un circuito en cuanto a resonancia en paralelo**
  - Describir la resonancia en paralelo en un circuito ideal
  - Describir la resonancia en paralelo en un circuito no ideal
  - Explicar cómo varía la impedancia con la frecuencia
  - Determinar la corriente y el ángulo de fase en condición de resonancia
  - Determinar la frecuencia resonante en paralelo

Condición para resonancia ideal en paralelo

De manera ideal, la resonancia en paralelo ocurre cuando $X_C = X_L$. La frecuencia a la cual ocurre la resonancia se llama *frecuencia resonante*, exactamente como en el caso en serie. Cuando $X_C = X_L$, las corrientes de rama, I_C e I_L, son iguales en magnitud, y, desde luego, siempre están desfasadas entre sí en 180°. Por tanto, las dos corrientes se cancelan y la corriente total es de cero, como ilustra la figura 17-27.



(a) Circuito en paralelo en resonancia ($X_C = X_L$, $Z = \infty$) (b) Fasores de corriente (c) Formas de onda de corriente

▲ **FIGURA 17–27**

Circuito *LC* ideal en paralelo en resonancia.

Dado que la corriente total es de cero, la impedancia del circuito *LC* en paralelo es infinitamente grande (∞). Estas condiciones resonantes ideales se formulan como sigue:

$$X_L = X_C$$
$$Z_r = \infty$$

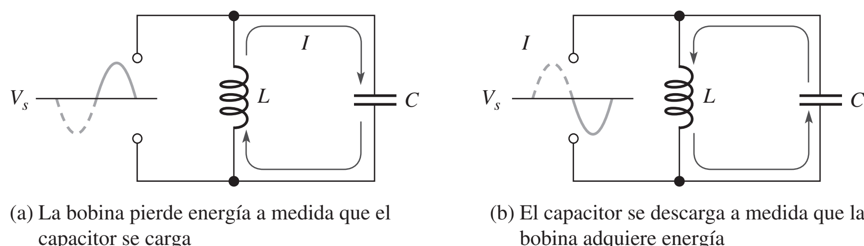
Frecuencia resonante en paralelo

Para un circuito resonante ideal (sin resistencia) dispuesto en paralelo, la frecuencia a la cual ocurre la resonancia se determina con la misma fórmula utilizada para un circuito resonante en serie; es decir

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Circuito tanque

Al circuito *LC* resonante dispuesto en paralelo a menudo se le llama **circuito tanque**. El término *circuito tanque* se refiere al hecho de que el circuito resonante en paralelo guarda energía en el campo magnético de la bobina y en el campo eléctrico del capacitor. La energía almacenada se transfiere alternadamente entre el capacitor y la bobina en semiciclos alternos conforme la corriente fluye en un sentido y luego en el otro cuando el inductor pierde energía y el capacitor se carga, y viceversa. El concepto se ilustra en la figura 17-28.



(a) La bobina pierde energía a medida que el capacitor se carga

(b) El capacitor se descarga a medida que la bobina adquiere energía

▲ FIGURA 17–28

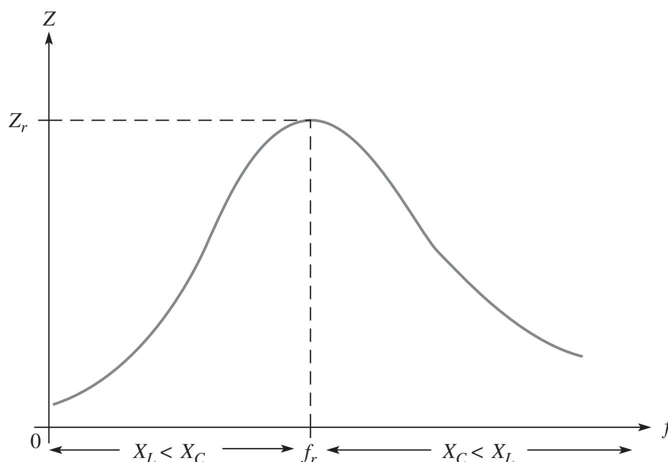
Almacenamiento de energía en un circuito tanque ideal resonante en paralelo.

Variación de la impedancia con la frecuencia

De manera ideal, la impedancia de un circuito resonante dispuesto en paralelo es infinita. En la práctica, la impedancia es máxima a la frecuencia resonante y disminuye a frecuencias más bajas y más altas, como indica la curva de la figura 17-29.

▶ FIGURA 17–29

Curva generalizada de impedancia para un circuito resonante dispuesto en paralelo. El circuito es inductivo por debajo de f_r, resistivo en f_r, y capacitivo por encima de f_r.



A frecuencias muy bajas, X_L es muy pequeña y X_C muy alta, así que la impedancia total es igual a la de la rama inductiva. Conforme aumenta la frecuencia, la impedancia también se incrementa y la reactancia inductiva domina (porque es menor que X_C) hasta que se alcanza la frecuencia resonante. En este momento, desde luego, $X_L > X_C$ (con $Q > 10$) y la impedancia llega a su

máximo. A medida que la frecuencia se incrementa por encima de la condición de resonancia, la reactancia capacitiva domina (porque es menor que X_L) y la impedancia disminuye.

Corriente y ángulo de fase a frecuencia resonante

En el circuito tanque ideal, la corriente total suministrada por la fuente a frecuencia resonante es de cero porque la impedancia es infinita. En el caso no ideal, cuando se considera la resistencia de devanado, hay algo de la corriente total en la frecuencia resonante, y ello está determinado por la impedancia en condición de resonancia.

$$I_{tot} = \frac{V_s}{Z_r}$$

Ecuación 17–11

El ángulo de fase del circuito resonante dispuesto en paralelo es de 0° porque la impedancia es puramente resistiva a la frecuencia resonante.

Efecto de la resistencia de devanado en la frecuencia resonante en paralelo

Cuando se considera la resistencia de devanado, la condición resonante se expresa como

$$2\pi f_r L\left(\frac{Q^2 + 1}{Q^2}\right) = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

donde Q es el **factor de calidad** de la bobina, X_L/R_W. Resolviendo para f_r en función de Q se obtiene

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2 + 1}}$$

Ecuación 17–12

Cuando $Q \geq 10$, el término con factores Q es aproximadamente de 1.

$$\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2 + 1}} = \sqrt{\frac{100}{101}} = 0.995 \cong 1$$

Por consiguiente, la frecuencia resonante en paralelo es aproximadamente la misma que la frecuencia resonante en serie en tanto Q sea igual a o mayor que 10.

$$f_r \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{por } Q \geq 10$$

Una expresión precisa para f_r en función de los valores de componente de circuito es

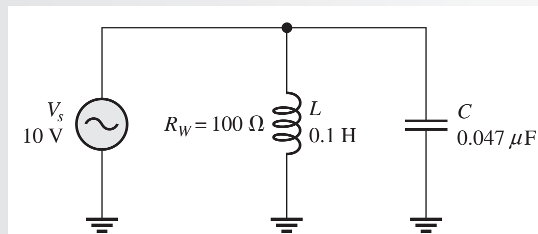
$$f_r = \frac{\sqrt{1 - (R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ecuación 17–13

Esta fórmula precisa rara vez es necesaria y la ecuación más simple $f_r = 1(2\pi\sqrt{LC})$ es suficiente en la mayoría de las situaciones prácticas. En el apéndice B se proporciona una derivación de la ecuación 17-13.

EJEMPLO 17–11 Determine la frecuencia precisa y el valor de Q en condición de resonancia para el circuito de la figura 17-30.

▶ **FIGURA 17–30**



Solución Use la ecuación 17-13 para determinar la frecuencia.

$$f_r = \frac{\sqrt{1 - (R_W^2C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{1 - [(100\ \Omega)^2(0.047\ \mu\text{F})/0.1\ \text{H}]}}{2\pi\sqrt{(0.047\ \mu\text{F})(0.1\ \text{H})}} = \mathbf{2.32\ kHz}$$

Para calcular el factor de calidad, Q, primero determine X_L.

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(2.32\ \text{kHz})(0.1\ \text{H}) = 1.46\ \text{k}\Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{1.46\ \text{k}\Omega}{100\ \Omega} = \mathbf{14.6}$$

Observe que como $Q > 10$, se puede utilizar la fórmula aproximada, $f_r \cong 1/(2\pi\sqrt{LC})$.

Problema relacionado Para una R_W más pequeña, ¿f_r será menor o mayor que 2.32 kHz?



Use el archivo Multisim E17-11 para comprobar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su respuesta en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 17-6

1. En resonancia en paralelo, ¿la impedancia es mínima o máxima?
2. En resonancia en paralelo, ¿la corriente es mínima o máxima?
3. En condición de resonancia ideal en paralelo, suponga $X_L = 1500\ \Omega$. ¿Cuál es X_C?
4. Un circuito tanque en paralelo tiene los siguientes valores: $R_W = 4\ \Omega$, $L = 50$ mH, y $C = 10$ pF. Calcule f_r.
5. Si $Q = 25$, L = 50 mH, y C = 1000 pF, ¿cuál es f_r?
6. En la pregunta 5, si Q = 2.5, ¿cuál es f_r?

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

Esto completa la cobertura de circuitos reactivos en paralelo. La cobertura de circuitos reactivos en serie-paralelo inicia en el capítulo 15, parte 3, en la página 635.

CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

Parte 3

17–7 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RLC* EN SERIE-PARALELO

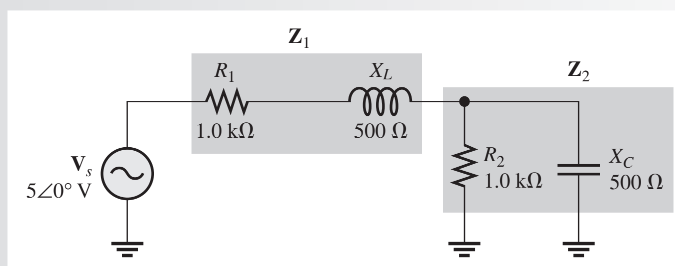
En esta sección, las combinaciones serie y paralelo de los componentes de R, L y C se analizan en ejemplos específicos. Además, se aborda la conversión de un circuito en serie-paralelo a un circuito equivalente en paralelo y se considera la resonancia en un circuito no ideal en paralelo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar circuitos *RLC* en serie-paralelo**
  - Determinar corrientes y voltajes
  - Convertir un circuito en serie-paralelo en una forma equivalente en paralelo
  - Analizar circuitos en paralelo no ideales (con resistencia de bobina) en cuanto a resonancia en paralelo
  - Examinar el efecto de una carga resistiva en un circuito tanque

Los dos ejemplos siguientes ilustran un acercamiento al análisis de circuitos con combinaciones en serie como en paralelo de resistencia, inductancia y capacitancia.

EJEMPLO 17–12 En la figura 17-31, determine el voltaje entre las terminales del capacitor en forma polar. ¿Es este circuito predominantemente inductivo o predominantemente capacitivo?



▲ FIGURA 17–31

Solución En este análisis, use la fórmula del divisor de voltaje. La impedancia de la combinación en serie de R_1 y X_L se llama $\mathbf{Z}_1$. En forma rectangular,

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 + jX_L = 1000\ \Omega + j500\ \Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z}_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R_1}\right)$$
$$= \sqrt{(1000\ \Omega)^2 + (500\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{500\ \Omega}{1000\ \Omega}\right) = 1118\angle 26.6^\circ\ \Omega$$

La impedancia de la combinación en paralelo de R_2 y X_C se llama $\mathbf{Z}_2$. En forma polar,

$$\mathbf{Z}_2 = \left(\frac{R_2X_C}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}\right)\angle -\tan^{-1}\left(\frac{R_2}{X_C}\right)$$
$$= \left[\frac{(1000\ \Omega)(500\ \Omega)}{\sqrt{(1000\ \Omega)^2 + (500\ \Omega)^2}}\right]\angle -\tan^{-1}\left(\frac{1000\ \Omega}{500\ \Omega}\right) = 447\angle -63.4^\circ\ \Omega$$

Al convertir a forma rectangular se obtiene

$$\mathbf{Z}_2 = Z_2\cos\theta + jZ_2\text{sen}\,\theta$$
$$= (447\ \Omega)\cos(-63.4^\circ) + j447\ \text{sen}(-63.4^\circ) = 200\ \Omega - j400\ \Omega$$

La impedancia total $\mathbf{Z}_{tot}$ en forma rectangular es

$$\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 = (1000\ \Omega + j500\ \Omega) + (200\ \Omega - j400\ \Omega) = 1200\ \Omega + j100\ \Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z}_{tot} = \sqrt{(1200\ \Omega)^2 + (100\ \Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{100\ \Omega}{1200\ \Omega}\right) = 1204\angle 4.76^\circ\ \Omega$$

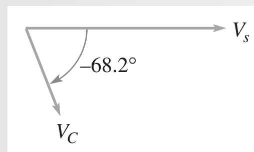
Ahora aplique la fórmula del divisor de voltaje para obtener $\mathbf{V}_C$.

$$\mathbf{V}_C = \left(\frac{\mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_{tot}}\right)\mathbf{V}_s = \left(\frac{447\angle -63.4^\circ\ \Omega}{1204\angle 4.76^\circ\ \Omega}\right)5\angle 0^\circ\ \text{V} = \mathbf{1.86\angle -68.2^\circ\ V}$$

Por consiguiente, V_C es de 1.86 V y está retrasado en 68.2° con respecto a V_s.

El término $+j$ en $\mathbf{Z}_{tot}$, o el ángulo positivo en su forma polar, indica que el circuito es más inductivo que capacitivo. No obstante, es sólo un poco más inductivo porque el ángulo es pequeño. Este resultado puede sorprendernos, porque $X_C = X_L = 500\ \Omega$. Sin embargo, el capacitor está en paralelo con un resistor, así que en realidad el efecto del capacitor en la impedancia total es menor que el del inductor. La figura 17-32 muestra la relación fasorial de V_C y V_s. Aunque $X_C = X_L$, este circuito no está en condición de resonancia porque el término j de la impedancia total no es de cero debido a la combinación en paralelo de R_2 y X_C. Esto queda de manifiesto al observar que el ángulo de fase asociado con $\mathbf{Z}_{tot}$ es de 4.76° y no de cero.

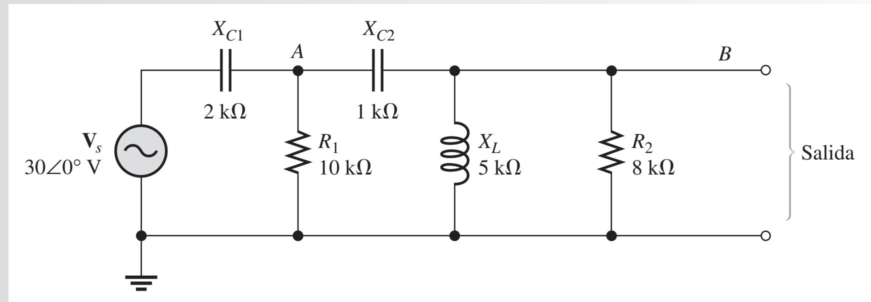
▶ **FIGURA 17–32**



Problema relacionado Determine el voltaje entre las terminales del capacitor en forma polar si R_1 se incrementa a 2.2 kΩ.

EJEMPLO 17–13 Para el circuito reactivo de la figura 17-33, encuentre el voltaje en el punto B con respecto a tierra.

▶ **FIGURA 17–33**



Solución El voltaje ($\mathbf{V}_B$) en el punto B es el voltaje entre las terminales de salida abiertas. Use el método del divisor de voltaje. Para ello, primero debe conocer el voltaje ($\mathbf{V}_A$) en el punto A; por lo que es necesario determinar la impedancia desde el punto A hasta tierra como un punto de partida.

La combinación en paralelo de X_L y R_2 está en serie con X_{C2}. Esta combinación está en paralelo con R_1. Llamemos a $\mathbf{Z}_A$ la impedancia desde el punto A hasta tierra. Para determinar $\mathbf{Z}_A$, siga los siguientes pasos. La impedancia de la combinación en paralelo de R_2 y X_L se designa como $\mathbf{Z}_1$.

$$\mathbf{Z}_1 = \left(\frac{R_2X_L}{\sqrt{R_2^2 + X_L^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{R_2}{X_L}\right)$$

$$= \left(\frac{(8\text{ k}\Omega)(5\text{ k}\Omega)}{\sqrt{(8\text{ k}\Omega)^2 + (5\text{ k}\Omega)^2}}\right)\angle\tan^{-1}\left(\frac{8\text{ k}\Omega}{5\text{ k}\Omega}\right) = 4.24\angle 58.0^\circ\text{ k}\Omega$$

A continuación, combine $\mathbf{Z}_1$ en serie con $\mathbf{X}_{C2}$ para obtener la impedancia $\mathbf{Z}_2$.

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{X}_{C2} + \mathbf{Z}_1$$
$$= 1\angle -90^\circ\text{ k}\Omega + 4.24\angle 58^\circ\text{ k}\Omega = -j1\text{ k}\Omega + 2.25\text{ k}\Omega + j3.6\text{ k}\Omega$$
$$= 2.25\text{ k}\Omega + j2.6\text{ k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z}_2 = \sqrt{(2.25\text{ k}\Omega)^2 + (2.6\text{ k}\Omega)^2}\angle\tan^{-1}\left(\frac{2.6\text{ k}\Omega}{2.25\text{ k}\Omega}\right) = 3.44\angle 49.1^\circ\text{ k}\Omega$$

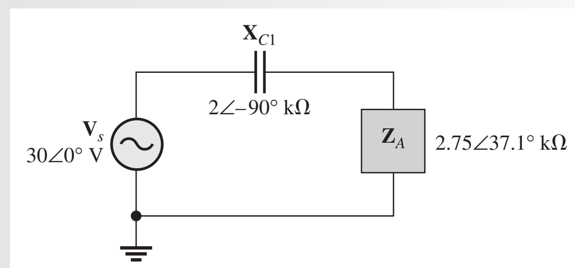
Por último, combine $\mathbf{Z}_2$ y $\mathbf{R}_1$ en paralelo para obtener $\mathbf{Z}_A$.

$$\mathbf{Z}_A = \frac{\mathbf{R}_1\mathbf{Z}_2}{\mathbf{R}_1 + \mathbf{Z}_2} = \frac{(10\angle 0^\circ\text{ k}\Omega)(3.44\angle 49.1^\circ\text{ k}\Omega)}{10\text{ k}\Omega + 2.25\text{ k}\Omega + j2.6\text{ k}\Omega}$$

$$= \frac{34.4\angle 49.1^\circ\text{ k}\Omega}{12.25\text{ k}\Omega + j2.6\text{ k}\Omega} = \frac{34.4\angle 49.1^\circ\text{ k}\Omega}{12.5\angle 12.0^\circ\text{ k}\Omega} = 2.75\angle 37.1^\circ\text{ k}\Omega$$

El circuito simplificado se muestra en la figura 17-34.

▶ **FIGURA 17–34**



A continuación, use el principio del divisor de voltaje para determinar ($\mathbf{V}_A$) en el punto A en la figura 17-33. La impedancia total es

$$\mathbf{Z}_{tot} = \mathbf{X}_{C1} + \mathbf{Z}_A$$
$$= 2\angle -90^\circ\,\text{k}\Omega + 2.75\angle 37.1^\circ\,\text{k}\Omega = -j2\,\text{k}\Omega + 2.19\,\text{k}\Omega + j1.66\,\text{k}\Omega$$
$$= 2.19\,\text{k}\Omega - j0.340\,\text{k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z}_{tot} = \sqrt{(2.19\,\text{k}\Omega)^2 + (0.340\,\text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{0.340\,\text{k}\Omega}{2.19\,\text{k}\Omega}\right) = 2.22\angle -8.82^\circ\,\text{k}\Omega$$

El voltaje en el punto A es

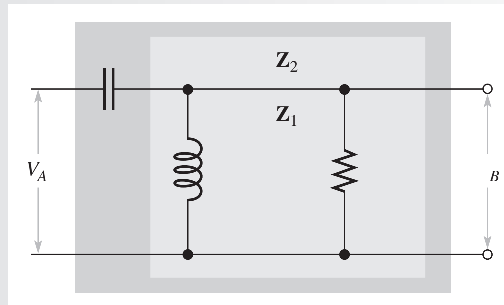
$$\mathbf{V}_A = \left(\frac{\mathbf{Z}_A}{\mathbf{Z}_{tot}}\right)\mathbf{V}_s = \left(\frac{2.75\angle 37.1^\circ\,\text{k}\Omega}{2.22\angle -8.82^\circ\,\text{k}\Omega}\right)30\angle 0^\circ\,\text{V} = 37.2\angle 45.9^\circ\,\text{V}$$

En seguida, calcule el voltaje ($\mathbf{V}_B$) en el punto B dividiendo $\mathbf{V}_A$, como se indica en la figura 17-35. $\mathbf{V}_B$ es el voltaje de salida en la terminal abierta.

$$\mathbf{V}_B = \left(\frac{\mathbf{Z}_1}{\mathbf{Z}_2}\right)\mathbf{V}_A = \left(\frac{4.24\angle 58^\circ\,\text{k}\Omega}{3.44\angle 49.1^\circ\,\text{k}\Omega}\right)37.2\angle 45.9^\circ\,\text{V} = \mathbf{45.9\angle 54.8^\circ\,V}$$

De modo sorpresivo, ¡V_A es más grande que V_s y V_B es más grande que V_A! Este resultado es posible gracias a la relación de desfase de los voltajes reactivos. Recuerde que X_C y X_L tienden a eliminarse entre sí.

▶ FIGURA 17–35



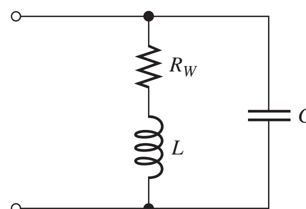
Problema relacionado ¿Cuál es el voltaje en forma polar entre las terminales de C_1 en la figura 17-33?

Conversión de en serie-paralelo a paralelo

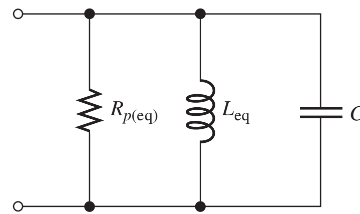
La configuración particular en serie-paralelo mostrada en la figura 17-36 es importante porque representa un circuito que tiene ramas L y C en paralelo, con la resistencia de devanado de la bobina tomada en cuenta como resistencia en serie en la rama L.

▶ FIGURA 17–36

Un circuito *RLC* dispuesto en paralelo ($Q = X_L/R_W$).



Es conveniente ver al circuito en serie-paralelo de la figura 17-36 en una forma equivalente en paralelo, como indica la figura 17-37.



◀ **FIGURA 17–37**

Forma equivalente en paralelo del circuito de la figura 17-36.

Las fórmulas siguientes proporcionan la inductancia equivalente, L_{eq}, y la resistencia en paralelo equivalente, $R_{p(eq)}$:

$$L_{eq} = L\left(\frac{Q^2 + 1}{Q^2}\right)$$ **Ecuación 17–14**

$$R_{p(eq)} = R_W(Q^2 + 1)$$ **Ecuación 17–15**

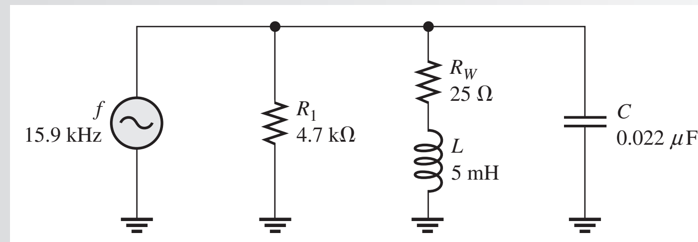
donde Q es el factor de calidad de la bobina, X_L/R_W. Las derivaciones de estas fórmulas son bastante complicadas, y por tanto no se muestran aquí. Advierta en las ecuaciones que, con $Q \geq 10$, el valor de L_{eq} es aproximadamente el mismo que el valor original de L. Por ejemplo, si $L = 10$ mH y $Q = 10$, entonces

$$L_{eq} = 10\text{ mH}\left(\frac{10^2 + 1}{10^2}\right) = 10\text{ mH}(1.01) = 10.1\text{ mH}$$

La equivalencia de los circuitos significa que, a una frecuencia dada, cuando se aplica el mismo valor de voltaje a ambos circuitos, la misma corriente total fluye en ambos circuitos y los ángulos de fase son los mismos. De manera básica, un circuito equivalente sólo propicia que el análisis de circuitos sea más conveniente.

EJEMPLO 17–14 Convierta el circuito en serie-paralelo de la figura 17-38 en una forma equivalente dispuesta en paralelo a la frecuencia dada.

▶ **FIGURA 17–38**



Solución Determine la reactancia inductiva.

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(15.9\text{ kHz})(5\text{ mH}) = 500\ \Omega$$

El factor Q de la bobina es

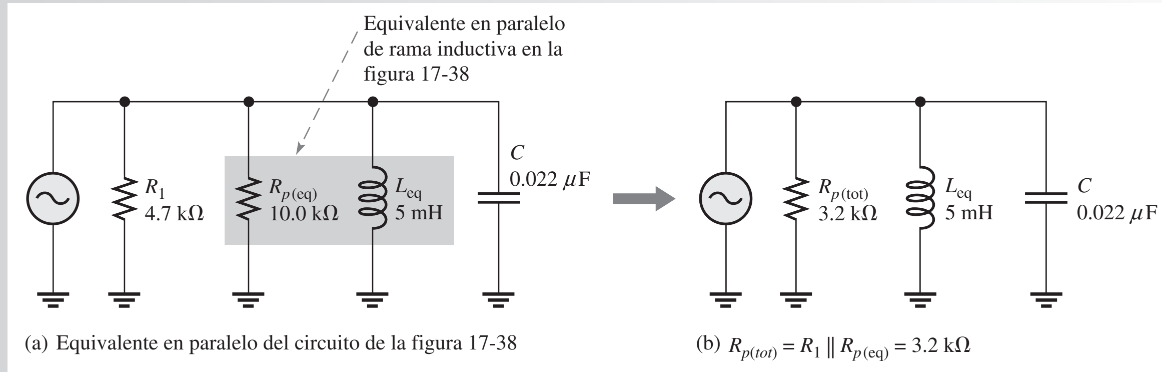
$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{500\ \Omega}{25\ \Omega} = 20$$

Como $Q > 10$, entonces $L_{eq} > L = 5$ mH.

La resistencia equivalente en paralelo es

$$R_{p(\text{eq})} = R_W(Q^2 + 1) = (25\ \Omega)(20^2 + 1) = 10\ \text{k}\Omega$$

Esta resistencia equivalente aparece en paralelo con R_1 como se muestra en la figura 17-39(a). Cuando se combinan, resulta una resistencia total en paralelo ($R_{p(tot)}$) de 3.2 kΩ, como indica la figura 17-39(b).



▲ FIGURA 17–39

Problema relacionado Determine el circuito equivalente en paralelo si $R_W = 10\ \Omega$ en la figura 17-38.

Condiciones resonantes en paralelo en un circuito no ideal

La resonancia de un circuito *LC* ideal dispuesto en paralelo se examinó en la sección 17-6. Ahora, consideremos la resonancia en un circuito tanque con la resistencia de la bobina tomada en cuenta. La figura 17-40 muestra un circuito tanque no ideal y su equivalente *RLC* en paralelo.

Recuerde que el factor de calidad, Q, del circuito en condición de resonancia es simplemente el factor Q de la bobina.

$$Q = \frac{X_L}{R_W}$$

Las expresiones para la inductancia equivalente y la resistencia equivalente en paralelo se dieron en las ecuaciones 17-14 y 17-15 como

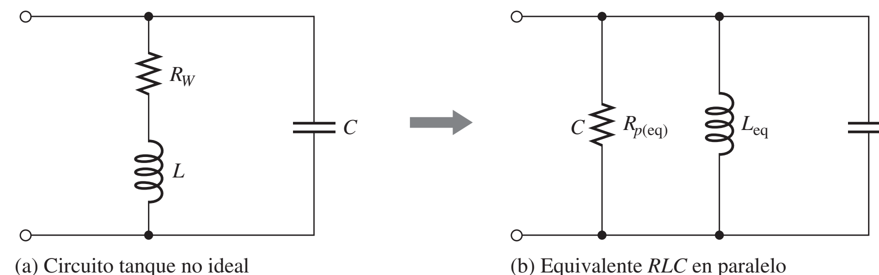
$$L_{\text{eq}} = L\left(\frac{Q^2 + 1}{Q^2}\right)$$

$$R_{p(\text{eq})} = R_W(Q^2 + 1)$$

Para $Q \geq 10$, $L_{\text{eq}} \cong L$.

▶ FIGURA 17–40

Un tratamiento práctico de circuitos resonantes dispuestos en paralelo debe incluir la resistencia de la bobina.



En condición de resonancia en paralelo,

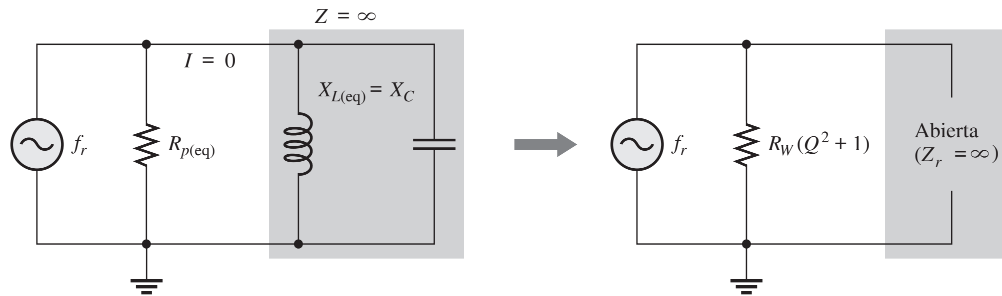
$$X_{L(\text{eq})} = X_C$$

En el circuito equivalente en paralelo, $R_{p(\text{eq})}$ está en paralelo con una bobina ideal y un capacitor, por lo que las ramas L y C actúan como un circuito tanque ideal cuya impedancia es infinita en condición de resonancia, de acuerdo con la figura 17-41. Por consiguiente, la impedancia total del circuito tanque no ideal en condición de resonancia se expresa simplemente como la resistencia equivalente en paralelo.

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1)$$

Ecuación 17–16

En el apéndice *B* se proporciona una derivación de la ecuación 17-16.

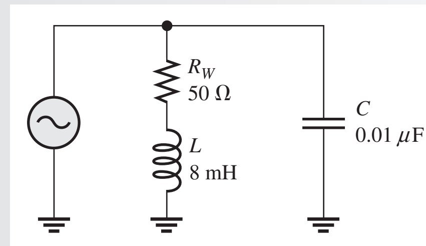


▲ **FIGURA 17–41**

En resonancia, la parte *LC* dispuesta en paralelo aparece abierta y la fuente ve sólo $R_{p(eq)}$.

EJEMPLO 17–15 Determine la impedancia del circuito mostrado en la figura 17-42 a la frecuencia resonante ($f_r \cong 17{,}794$ Hz).

▶ **FIGURA 17–42**



Solución Antes de poder calcular la impedancia con la ecuación 17-16, debe determinar el factor de calidad. Para obtener Q, encuentre primero la reactancia inductiva.

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(17{,}794 \text{ Hz})(8 \text{ mH}) = 894 \ \Omega$$

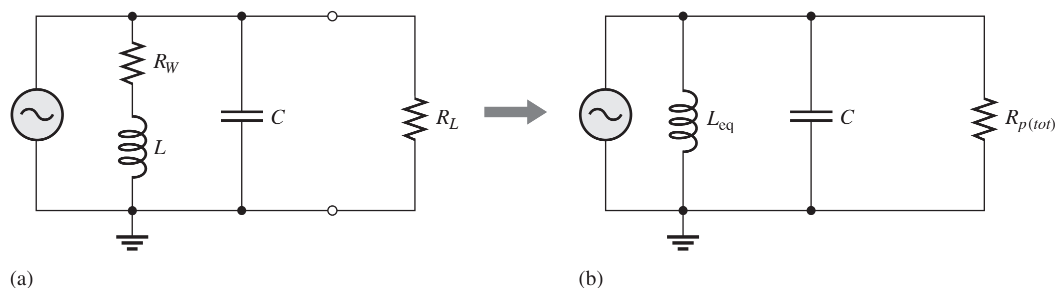
$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{894 \ \Omega}{50 \ \Omega} = 17.9$$

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1) = 50 \ \Omega(17.9^2 + 1) = \mathbf{16.1 \ k\Omega}$$

Problema relacionado Determine Z_r para $R_W = 10 \ \Omega$.

Una resistencia de carga externa afecta un circuito tanque

En la mayoría de las situaciones prácticas, una resistencia de carga externa aparece en paralelo con un circuito tanque no ideal, como se muestra en la figura 17-43(a). Evidentemente, el resistor externo (R_L) disipará más de la energía suministrada por la fuente, y por tanto se reducirá el



▲ **FIGURA 17–43**

Circuito tanque con un resistor de carga dispuesto en paralelo y su circuito equivalente.

factor Q total del circuito. El resistor externo aparece efectivamente en paralelo con la resistencia equivalente en paralelo de la bobina, $R_{p(\text{eq})}$, y ambos se combinan para determinar la resistencia total en paralelo, $R_{p(tot)}$, como indica la figura 17-43(b).

$$R_{p(tot)} = R_L \| R_{p(\text{eq})}$$

El factor Q total, designado mediante Q_O, para un circuito *RLC* dispuesto en paralelo se expresa en forma diferente al factor Q de un circuito en serie.

Ecuación 17–17

$$Q_O = \frac{R_{p(tot)}}{X_{L(\text{eq})}}$$

Tal como puede advertirse, el efecto de carga del circuito tanque es reducir su Q total (el cual es igual al factor Q de la bobina cuando está descargado).

REPASO DE LA SECCIÓN 17-7

1. Cierto circuito resonante tiene un inductor de 100 μH con resistencia de devanado de 2 Ω en paralelo con un capacitor de 0.22 μF. Si $Q = 8$, determine el equivalente en paralelo de este circuito.
2. Determine la inductancia y la resistencia en paralelo equivalentes a una bobina de 20 mH con resistencia de devanado de 10 Ω a una frecuencia de 1 kHz.

NOTA SOBRE LA ALTERNATIVA 2

Esto completa la cobertura de circuitos en serie-paralelo. La cobertura de temas especiales se inicia en el capítulo 15, parte 4, en la página 642.

TEMAS ESPECIALES

Parte 4

17–8 ANCHO DE BANDA DE CIRCUITOS RESONANTES

En un circuito *RLC* dispuesto en serie, la corriente alcanza su valor máximo a la frecuencia resonante porque las reactancias se eliminan entre sí. En un circuito *RLC* en paralelo, la corriente es mínima en la frecuencia resonante porque las corrientes inductiva y capacitiva se eliminan entre sí. Este comportamiento del circuito se relaciona con una característica llamada ancho de banda.

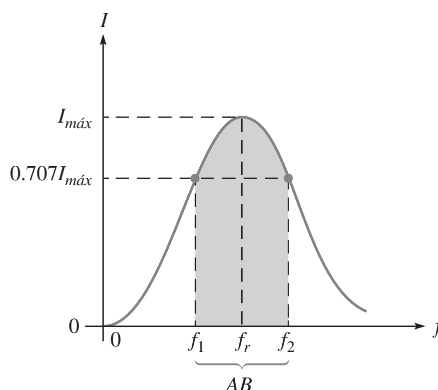
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Determinar el ancho de banda de circuitos resonantes**
  - Analizar el ancho de banda de circuitos resonantes en serie y en paralelo
  - Enunciar la fórmula para ancho de banda
  - Definir el término *frecuencia a potencia media*
  - Definir el término *selectividad*
  - Explicar cómo afecta *Q* al ancho de banda

Circuitos resonantes en serie

En un circuito *RLC* dispuesto en serie, la corriente es máxima a la frecuencia resonante (también conocida como *frecuencia central*) y se reduce a uno y otro lado de esta frecuencia. El ancho de banda, abreviado en ocasiones *AB*, es una característica importante de un circuito resonante. El ancho de banda es el intervalo de frecuencias dentro del cual la corriente es igual a o mayor que el 70.7% de su valor resonante.

La figura 17-44 ilustra el ancho de banda en la curva de respuesta de un circuito *RLC* en serie. Advierta que la frecuencia f_1 por debajo de f_r es el punto en el cual la corriente es $0.707I_{máx}$ y comúnmente se conoce como *frecuencia crítica inferior*. La frecuencia f_2 por encima de f_r, donde la corriente es de nuevo $0.707I_{máx}$, es la *corriente crítica superior*. Otros nombres para f_1 y f_2 son *frecuencias* -3 *dB*, *frecuencias de corte*, y *frecuencias a potencia media*. La importancia del último término se analiza más adelante en el capítulo.



◀ **FIGURA 17–44**

Ancho de banda en una curva de respuesta resonante en serie para *I*.

EJEMPLO 17–16 Un circuito resonante en serie tiene una corriente máxima de 100 mA a la frecuencia resonante. ¿Cuál es el valor de la corriente a las frecuencias críticas?

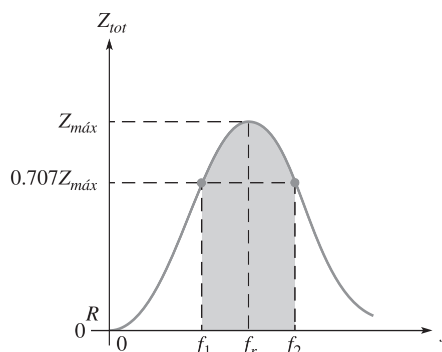
Solución La corriente a las frecuencias críticas es el 70.7% de la corriente máxima.

$$I_{f1} = I_{f2} = 0.707 I_{máx} = 0.707(100\text{ mA}) = \mathbf{70.7\text{ mA}}$$

Problema relacionado Cierto circuito resonante en serie tiene una corriente de 25 mA a las frecuencias críticas. ¿Cuál es la corriente en condición de resonancia?

Circuitos resonantes en paralelo

En un circuito resonante en paralelo, la impedancia es máxima a la frecuencia resonante; de modo que la corriente total es mínima. El ancho de banda se define en relación con la curva de impedancia del mismo modo en que la curva de corriente fue utilizada en el circuito en serie. Desde luego, f_r es la frecuencia a la cual Z es máxima; f_1 es la frecuencia crítica inferior a la cual $Z = 0.707Z_{máx}$; y f_2 es la frecuencia crítica superior a la cual de nuevo $Z = 0.707Z_{máx}$. El ancho de banda es el intervalo de frecuencias entre f_1 y f_2, como se muestra en la figura 17-45.



▶ **FIGURA 17–45**

Ancho de banda de la curva de respuesta resonante en paralelo para Z_{tot}.

Fórmula para el ancho de banda

El ancho de banda para circuitos resonantes en serie o en paralelo es el intervalo de frecuencias localizado entre las frecuencias críticas para las cuales la curva de respuesta (I o Z) es de 0.707 del valor máximo. Así, el ancho de banda es en realidad la diferencia entre f_2 y f_1.

Ecuación 17–18

$$AB = f_2 - f_1$$

De manera ideal, f_r es la frecuencia central y se calcula como sigue:

Ecuación 17–19

$$f_r = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

EJEMPLO 17–17 Un circuito resonante tiene una frecuencia crítica baja de 8 kHz y una frecuencia crítica alta de 12 kHz. Determine el ancho de banda y la frecuencia central (resonante).

Solución

$$AB = f_2 - f_1 = 12\text{ kHz} - 8\text{ kHz} = \mathbf{4\text{ kHz}}$$

$$f_r = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{12\text{ kHz} + 8\text{ kHz}}{2} = \mathbf{10\text{ kHz}}$$

Problema relacionado Si el ancho de banda de un circuito resonante es de 2.5 kHz y su frecuencia central de 8 kHz, ¿cuáles son las frecuencias críticas inferior y superior?

Frecuencias a potencia media

Tal como se mencionó previamente, a las frecuencias críticas superior e inferior en ocasiones se les llama **frecuencias a potencia media.** Este término se deriva del hecho de que la potencia suministrada por la fuente a estas frecuencias es la mitad de la potencia suministrada a frecuencia resonante. Lo que se presenta a continuación comprueba que esto es cierto para un circuito en serie. El mismo resultado final también se aplica a un circuito en paralelo. En condición de resonancia,

$$P_{máx} = I^2_{máx}R$$

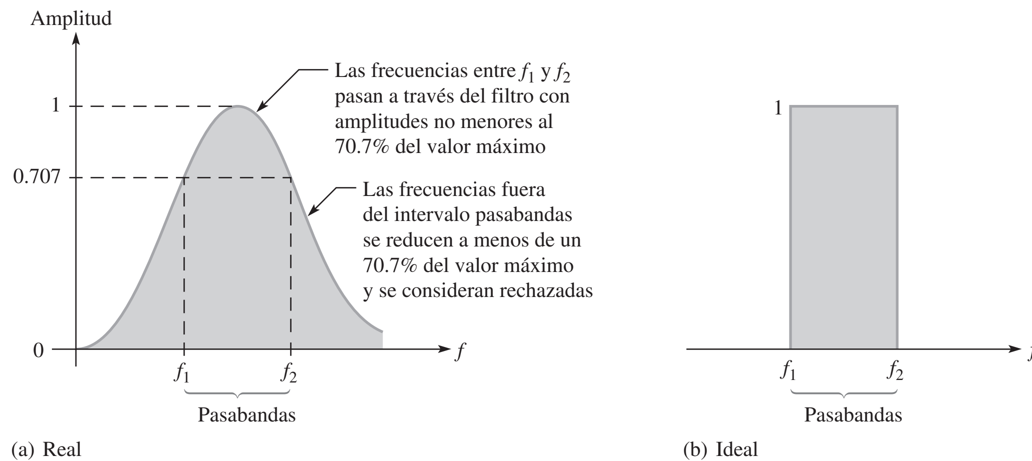
La potencia en f_1 o f_2 es

$$P_{f1} = I^2_{f1}R = (0.707I_{máx})^2R = (0.707)^2I^2_{máx}R = 0.5I^2_{máx}R = 0.5P_{máx}$$

Selectividad

Las curvas de respuesta que aparecen en las figuras 17-44 y 17-45 también se llaman *curvas de selectividad*. La **selectividad** define qué tan bien responde un circuito resonante a cierta frecuencia y discrimina todas las demás frecuencias. *Mientras más angosto es el ancho de banda, más grande es la selectividad.*

Por lo general, se supone que un circuito resonante acepta las frecuencias ubicadas dentro de su ancho de banda y elimina por completo aquellas que están fuera del ancho de banda. Pero realmente ese no es el caso, porque las señales con frecuencias localizadas fuera del ancho de banda no son eliminadas por completo. Su magnitud, sin embargo, se reduce en gran medida. Mientras más se alejan las frecuencias de las frecuencias críticas, mayor es la reducción, como ilustra la figura 17-46(a). En la figura 17-46(b) se muestra una curva ideal de selectividad.



▲ **FIGURA 17–46**

Curva generalizada de selectividad.

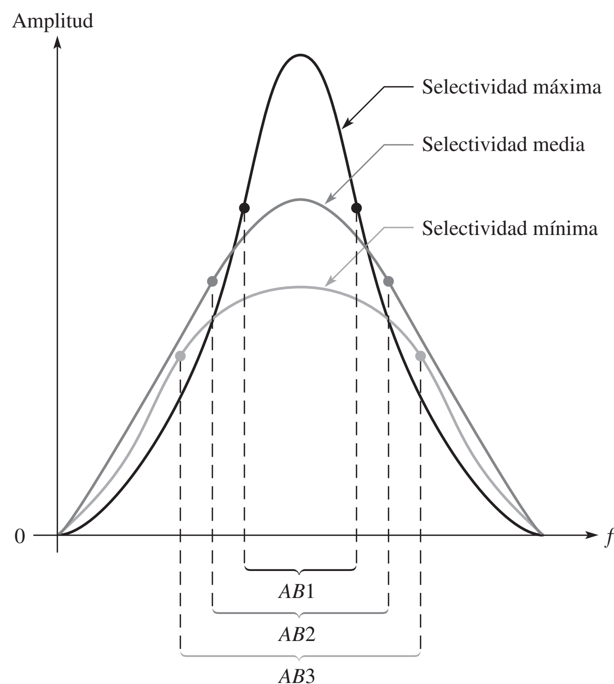
Tal como se aprecia en la figura 17-46, otro factor que influye en la selectividad es la inclinación de las pendientes de la curva. Mientras más rápido cae la curva a las frecuencias críticas, más selectivo es el circuito porque responde sólo a las frecuencias ubicadas dentro del ancho de banda. La figura 17-47 muestra una comparación general de tres curvas de respuesta con grados de selectividad variables.

Q afecta el ancho de banda

Un valor alto de Q produce un ancho de banda más angosto. Un valor bajo de Q produce un ancho de banda más amplio. En la siguiente ecuación se establece una fórmula para el ancho de banda de un circuito resonante en función de Q:

$$AB = \frac{f_r}{Q}$$

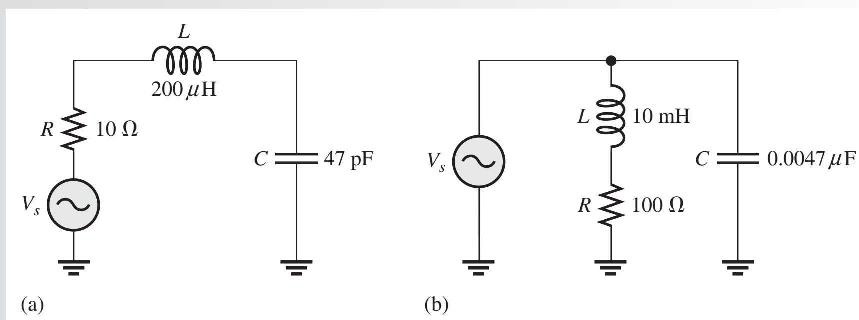
Ecuación 17–20



▲ **FIGURA 17–47**

Curvas comparativas de selectividad.

EJEMPLO 17–18 ¿Cuál es el ancho de banda de cada circuito mostrado en la figura 17-48?



▲ **FIGURA 17–48**

Solución Para el circuito de la figura 17-48(a), determine el ancho de banda como sigue:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(200\ \mu\text{H})(47\text{pF})}} = 1.64\ \text{MHz}$$

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(1.64\ \text{MHz})(200\ \mu\text{H}) = 2.06\ \text{k}\Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2.06\ \text{k}\Omega}{10\ \Omega} = 206$$

$$AB = \frac{f_r}{Q} = \frac{1.64\ \text{MHz}}{206} = \mathbf{7.96\ kHz}$$

Para el circuito de la figura 17-48(b),

$$f_r = \frac{\sqrt{1 - (R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(10\text{ mH})(0.0047\ \mu\text{F})}} = 23.2\text{ kHz}$$

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi(23.2\text{ kHz})(10\text{ mH}) = 1.46\text{ k}\Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{1.46\text{ k}\Omega}{100\ \Omega} = 14.6$$

$$AB = \frac{f_r}{Q} = \frac{23.2\text{ kHz}}{14.6} = \mathbf{1.59\text{ kHz}}$$

Problema relacionado Cambie C en la figura 17-48(a) a 1000 pF y determine el ancho de banda.



Use los archivos Multisim E17-18A y E17-18B para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 17-8

1. ¿Cuál es el ancho de banda cuando $f_2 = 2.2$ MHz y $f_1 = 1.8$ MHz?
2. Para un circuito resonante con las frecuencias críticas de la pregunta 1, ¿cuál es la frecuencia central?
3. La potencia disipada en condición de resonancia es de 1.8 W. ¿Cuál es la potencia a la frecuencia superior crítica?
4. Un factor Q más grande, ¿significa un ancho de banda más angosto o más amplio?

17–9 APLICACIONES

Se utilizan circuitos resonantes en una amplia variedad de aplicaciones, particularmente en sistemas de comunicación. En esta sección, se repasarán brevemente algunas aplicaciones de sistemas de comunicación comunes para ilustrar la importancia de los circuitos resonantes en el campo de las comunicaciones electrónicas.

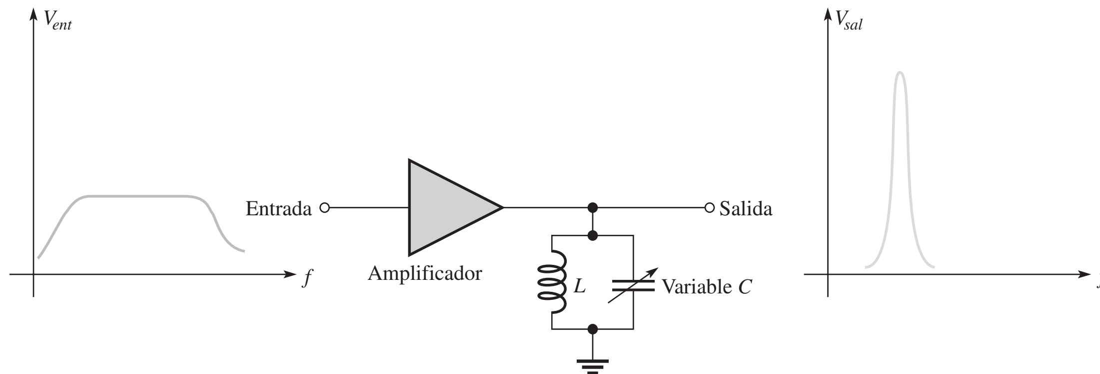
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar algunas aplicaciones de circuitos resonantes**
  - Describir una aplicación de amplificador sintonizado
  - Describir el acoplamiento por medio de antena
  - Describir los amplificadores sintonizados
  - Describir la separación de señales en un receptor
  - Describir un receptor de radio

Amplificadores sintonizados

Un *amplificador sintonizado* es un circuito que amplifica señales dentro de una banda especificada. De modo característico, un circuito resonante dispuesto en paralelo se utiliza junto con un amplificador para lograr la selectividad. En función de la operación general, las señales de entrada con frecuencias que oscilan dentro de una banda amplia son aceptadas a la entrada del amplificador

y amplificadas. El circuito resonante deja pasar sólo una banda relativamente angosta de esas frecuencias. El capacitor variable permite la sintonía dentro del intervalo de frecuencias de entrada de manera que una frecuencia deseada pueda seleccionarse, como indica la figura 17-49.

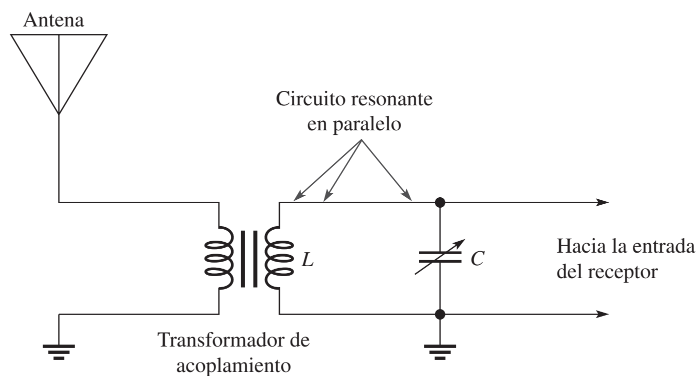


▲ **FIGURA 17–49**

Amplificador pasabandas básico sintonizado.

Entrada a un receptor vía una antena

Las señales de radio son enviadas desde un transmisor vía ondas electromagnéticas que se propagan por la atmósfera. Cuando las ondas electromagnéticas atraviesan una antena receptora se inducen voltajes pequeños. De entre todo el amplio intervalo de frecuencias electromagnéticas, sólo una frecuencia o una banda limitada de frecuencias debe ser extraída. La figura 17-50 muestra la disposición típica de una antena acoplada a la entrada del receptor mediante un transformador. Se conecta un capacitor variable entre las terminales del secundario del transformador para formar un circuito resonante en paralelo.

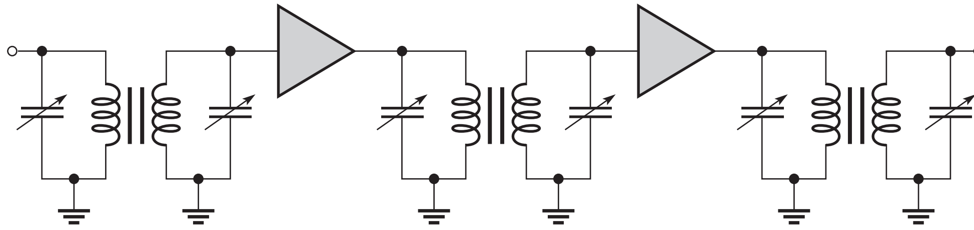


▲ **FIGURA 17–50**

Acoplamiento resonante de una antena.

Acoplamiento a un transformador doblemente sintonizado en un receptor

En algunos tipos de receptores de comunicación, los amplificadores sintonizados se acoplan a un transformador para incrementar la amplificación. Los capacitores pueden ser colocados en paralelo con los devanados primario y secundario del transformador, creando efectivamente dos filtros pasabandas resonantes en paralelo acoplados entre sí. Esta técnica, ilustrada en la figura 17-51, produce un mayor ancho de banda y pendientes más inclinadas en la curva de respuesta, con lo que se incrementa la selectividad para una banda de frecuencias deseada.



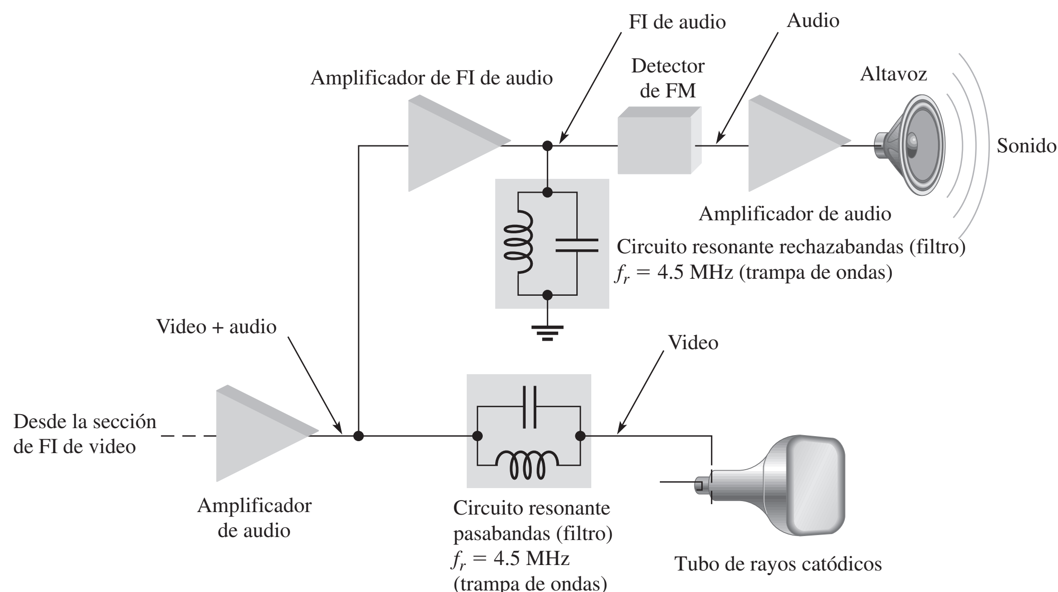
▲ FIGURA 17–51

Amplificadores doblemente sintonizados.

Recepción y separación de señales en un receptor de televisión

Un receptor de televisión debe manejar tanto señales de video (imágenes) como señales de audio (sonido). A cada estación transmisora se le asigna un ancho de banda de 6 MHz. Al canal 2 se le asigna una banda que va desde los 54 hasta los 59 MHz, al canal 3 una banda de 60 a 65 MHz, hasta alcanzar el canal 13 al cual se le asigna una banda desde los 210 hasta los 215 MHz. Se puede sintonizar el receptor de televisión para seleccionar cualquiera de estos canales mediante amplificadores sintonizados. La salida de señales del extremo frontal del receptor tiene un ancho de banda de 41 a 46 MHz, sin importar el canal en que esté sintonizado. Esta banda, llamada banda de *frecuencia intermedia* (FI), contiene tanto video como audio. Los amplificadores sintonizados a la banda FI refuerzan la señal y la alimentan hacia el amplificador de video.

Antes de que se aplique la salida del amplificador de audio al tubo de imagen, la señal de audio es eliminada por un circuito resonante rechazabandas de 4.5 MHz (llamado filtro *trampa de ondas*), según muestra la figura 17-52. Esta trampa evita que la señal de sonido interfiera con la imagen. También se aplica la salida del amplificador de video a circuitos pasabandas que están sintonizados a la frecuencia portadora de sonido de 4.5 MHz. La señal de sonido es procesada y aplicada entonces al altavoz como indica la figura 17-52.

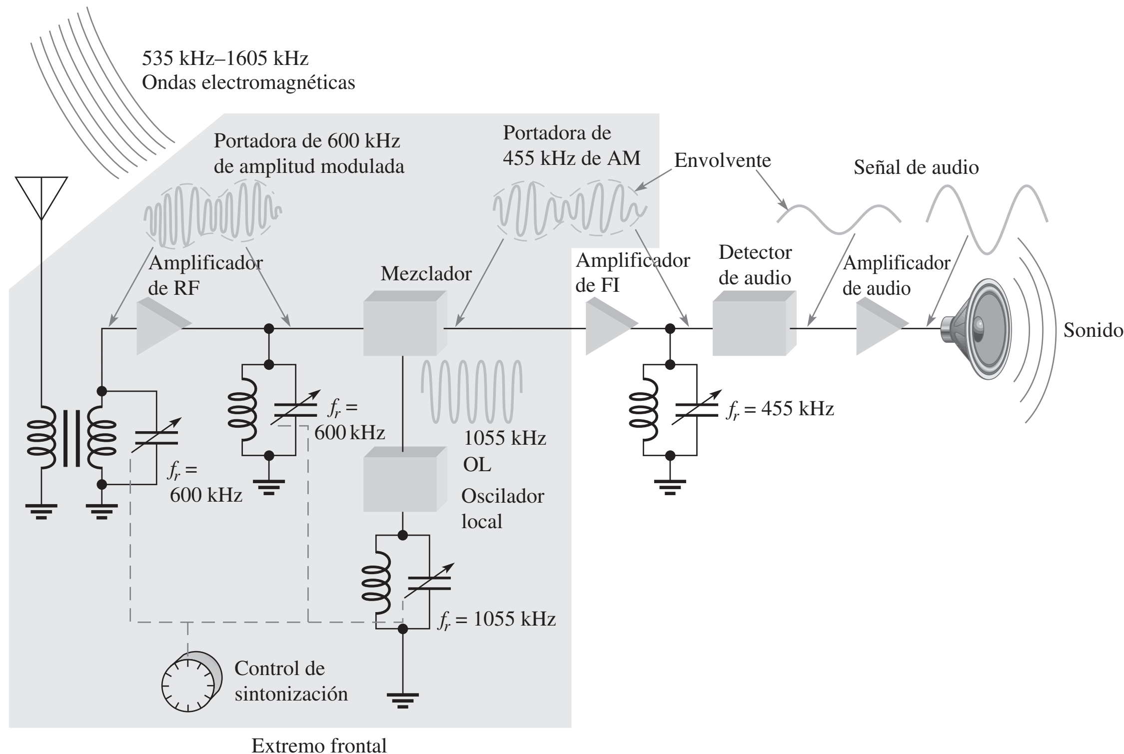


▲ FIGURA 17–52

Sección simplificada de un receptor de televisión que muestra el uso de un filtro.

Receptor superheterodino

Otro buen ejemplo de aplicaciones de circuito resonante (filtro) se encuentra en el receptor de AM (amplitud modulada) común. La banda de AM va desde 535 hasta 1605 kHz. A cada estación de



▲ **FIGURA 17–53**

Diagrama simplificado de un receptor de radio de AM superheterodino que muestra un ejemplo de la aplicación de circuitos resonantes sintonizados.

AM se le asigna un ancho de banda de 10 kHz dentro del intervalo. En la figura 17-53 se muestra un diagrama de bloques simplificado de un receptor de AM superheterodino.

Los circuitos sintonizados se diseñan para dejar pasar únicamente las señales de la estación de radio deseada y rechazar todas las demás. Para rechazar estaciones externas a la estación sintonizada, los circuitos sintonizados deben ser selectivos, dejando pasar sólo aquellas señales ubicadas dentro de la banda de los 10 kHz y rechazando todas las demás. Tampoco es deseable demasiada selectividad. Si el ancho de banda es muy angosto, algunas de las señales moduladas a una frecuencia más alta serán rechazadas, resultando cierta pérdida de fidelidad. Idealmente, el circuito resonante debe rechazar señales que no están en la pasabanda deseada.

En este sistema, existen tres circuitos resonantes en paralelo en el extremo frontal del receptor. Cada uno de estos circuitos resonantes es sintonizado en grupo por capacitores; es decir, los capacitores están mecánica o electrónicamente enlazados entre sí de modo que cambien juntos conforme se hace girar la perilla de sintonización. El extremo frontal se sintoniza para recibir una estación deseada, por ejemplo, una que transmita a 600 kHz. El circuito resonante de entrada de la antena y el circuito resonante amplificador de RF (radio frecuencia) seleccionan sólo una frecuencia de 600 kHz de entre todas las frecuencias que atraviesan la antena.

La señal de audio real (sonido) es transportada por la frecuencia portadora de 600 kHz modulando la amplitud de la portadora de modo que siga la señal de audio como está indicado. La variación de la magnitud de la portadora correspondiente a la señal de audio se llama *envolvente*. Luego se aplican los 600 kHz a un circuito llamado *mezclador*.

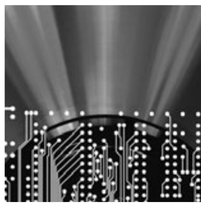
El *oscilador local* (OL) se sintoniza a una frecuencia que está 455 kHz por encima de la frecuencia seleccionada (1055 kHz, en este caso). Mediante un proceso llamado *heterodinización* o *batido*, se mezclan la señal de AM y la señal del oscilador local, y el mezclador convierte la señal de AM de 600 kHz en una señal de AM de 455 kHz (1055 kHz − 600 kHz = 455 kHz).

La frecuencia de 455 kHz es la frecuencia intermedia (FI) en receptores de AM estándar. No importa qué estación se seleccione dentro de la banda de transmisión, su frecuencia siempre es

convertida a la FI de 455 kHz. El amplificador de frecuencia intermedia, el cual se sintoniza a 455 kHz, amplifica la frecuencia intermedia de amplitud modulada. La salida del amplificador de frecuencia intermedia se aplica a un *detector de audio* que elimina la frecuencia intermedia y deja sólo la envolvente, que es la señal de audio. La señal de audio es entonces amplificada y aplicada al altavoz.

REPASO DE LA SECCIÓN 17-9

1. En general, ¿por qué es necesario un filtro sintonizado cuando se acopla una señal proveniente de una antena a la entrada de un receptor?
2. ¿Qué es una trampa de ondas?
3. ¿Qué significa sintonización en grupo?

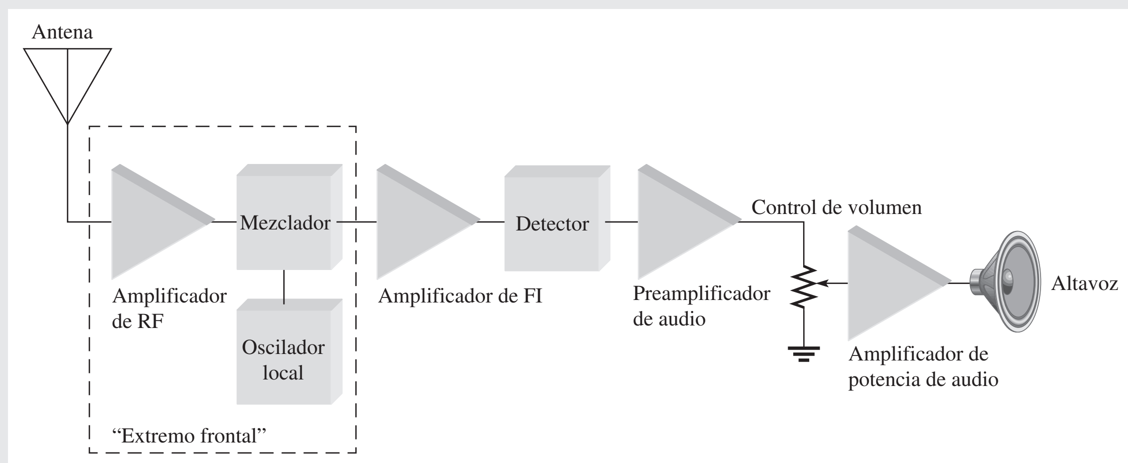


Una aplicación de circuito

En la aplicación de circuito del capítulo 11, se trabajó con un sistema receptor para aprender mediciones básicas de ca. En este capítulo, se utiliza otra vez el receptor para ilustrar una aplicación de circuitos resonantes. Nos enfocaremos en una parte del "extremo frontal" del sistema receptor que contiene circuitos resonantes. En general, el extremo frontal incluye el amplificador de RF, el oscilador local y el mezclador. En esta aplicación de circuito, el amplificador de RF es el foco. Por ahora no es necesario tener conocimientos de circuitos amplificadores.

En la figura 17-54 se muestra un diagrama de bloques básico para un receptor de radio de AM. En este sistema particular, el "extremo frontal" incluye los circuitos utilizados para sintonizar una estación transmisora deseada mediante selección de frecuencia para luego convertir dicha frecuencia en una intermedia estándar (FI). Las estaciones de radio de AM transmiten en el intervalo de frecuencias de 535 a 1605 kHz. El propósito del amplificador de RF es tomar las señales captadas por la antena, rechazar todas las señales excepto la señal de la estación deseada, y amplificarla a un nivel más alto.

En la figura 17-55 se muestra un diagrama esquemático de un amplificador de RF. El circuito de sintonización resonante en paralelo se compone de L, C_1 y C_2. Este amplificador de RF en particular no dispone de un circuito resonante en la salida. C_1 es un varactor, el cual es un dispositivo semiconductor sobre el que usted aprenderá más en un curso posterior. Todo lo que necesita saber en este momento es que el varactor es básicamente un capacitor variable cuya capacitancia varía al cambiar el voltaje de cd presente entre sus terminales. En este circuito, el voltaje de cd pro-

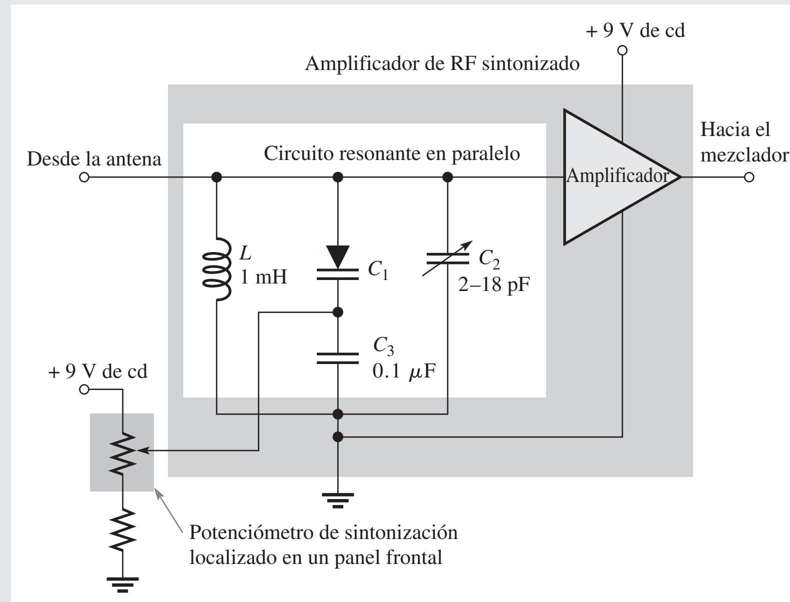


▲ **FIGURA 17–54**

Diagrama de bloques simplificado de un receptor básico de radio.

▶ FIGURA 17–55

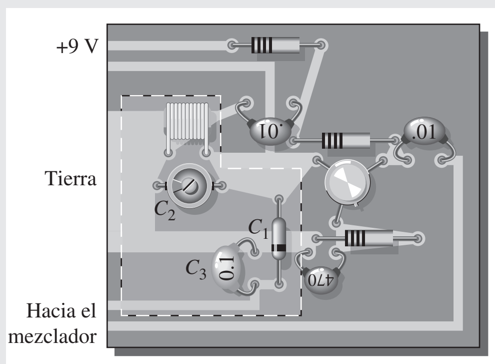
Diagrama esquemático parcial del amplificador de RF para mostrar el circuito de sintonización resonante.



viene del contacto deslizable del potenciómetro utilizado para sintonizar el receptor.

El voltaje procedente del potenciómetro puede ser variado desde +1 V hasta +9 V. El varactor particular utilizado en este circuito puede ser variado desde 200 pF a 1 V hasta 5 pF a 9 V. El capacitor C_2 es un capacitor regulador que se utiliza para ajustar inicialmente el circuito resonante. Una vez que se preajusta, se deja en ese valor. C_1 y C_2 están en paralelo y sus capacitancias se suman para producir la capacitancia total para el circuito resonante. C_3 tiene un efecto mínimo en el circuito resonante y puede ser ignorado. El propósito de C_3 es permitir que se aplique el voltaje de cd al varactor al mismo tiempo que crea una tierra de ca.

En esta aplicación de circuito, se trabajará con la tarjeta de circuito amplificador mostrada en la figura 17-56. Aunque todos los componentes del amplificador se encuentran en la tarjeta, la parte donde usted se enfocará es el circuito resonante indicado por el área resaltada.



▲ FIGURA 17–56

Tarjeta de circuito de un amplificador de RF.

Capacitancia en el circuito resonante

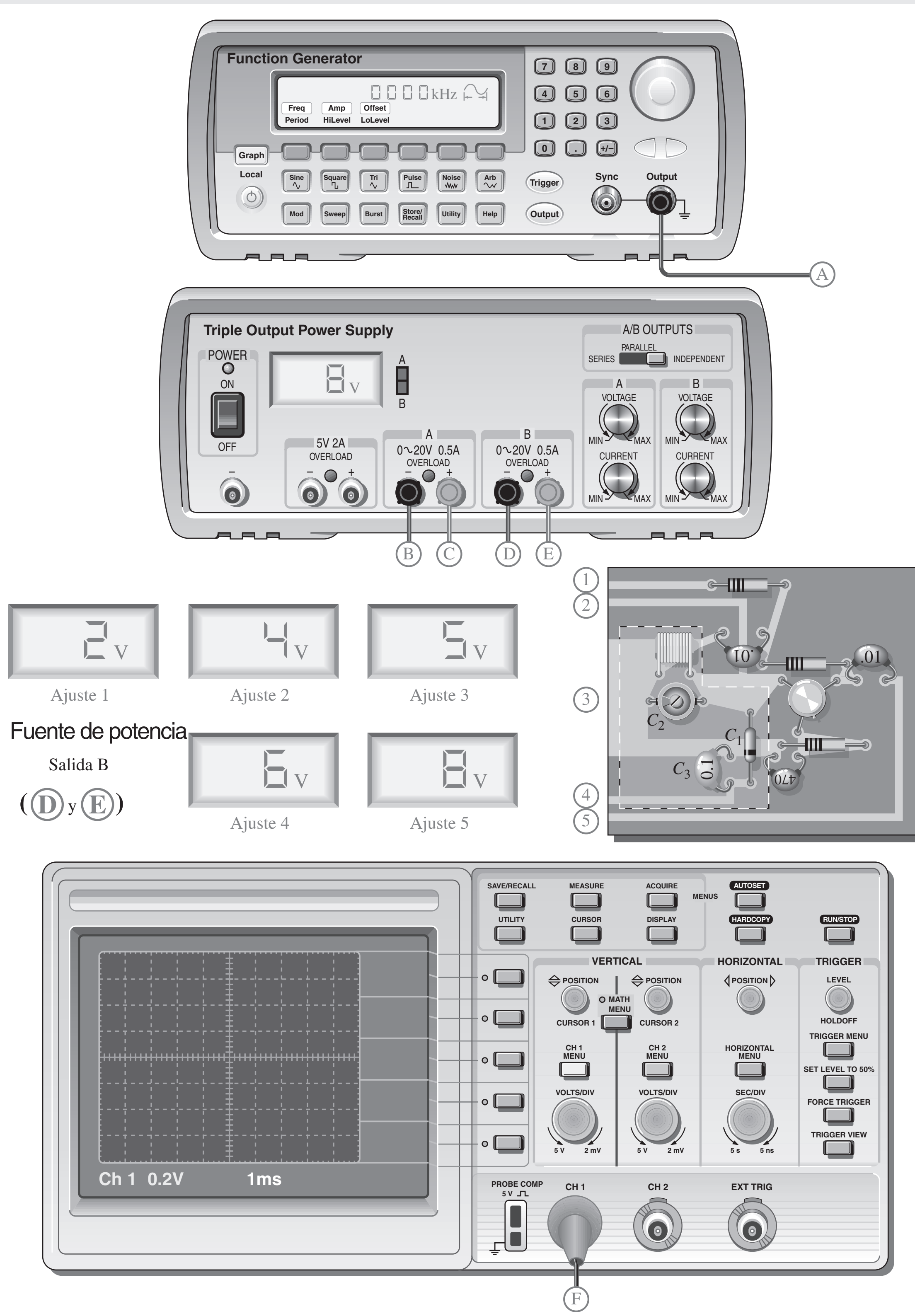
- ◆ Calcule un valor de capacitancia para C_2 que garantice una cobertura completa de la banda de frecuencia de AM conforme el varactor varía dentro de su intervalo de capacitancia. C_3 puede ser pasado por alto. El intervalo completo de frecuencias resonantes para el circuito de sintonización deberá más que abarcar la banda de AM, de modo que a la capacitancia máxima del varactor, la frecuencia resonante será menor que 535 kHz y a la capacitancia mínima del varactor, la frecuencia resonante será mayor que 1605 kHz.
- ◆ Con el valor de C_2 calculado, determine los valores de la capacitancia del varactor que producirán una frecuencia resonante de 535 y 1605 kHz, respectivamente.

Prueba del circuito resonante

- ◆ Sugiera un procedimiento para probar el circuito resonante con los instrumentos que aparecen en el montaje de banco de pruebas mostrado en la figura 17-57. Desarrolle un montaje de prueba creando una conexión de punto a punto en la tarjeta y los instrumentos.
- ◆ Con la gráfica de la figura 17-58 que muestra la variación de la capacitancia del varactor contra el voltaje del varactor, determine la frecuencia resonante para cada ajuste indicado desde las salidas *B* de la fuente de potencia (terminales de la extrema derecha). La salida *A* de la fuente de potencia se utiliza para suministrar 9 V al amplificador. La salida *B* de la fuente de potencia se utiliza para simular el voltaje del potenciómetro.

Repaso

1. ¿Cuál es el intervalo de la frecuencia de AM?
2. Mencione el propósito del amplificador de RF.
3. ¿Cómo se selecciona una frecuencia en particular en la banda de AM?

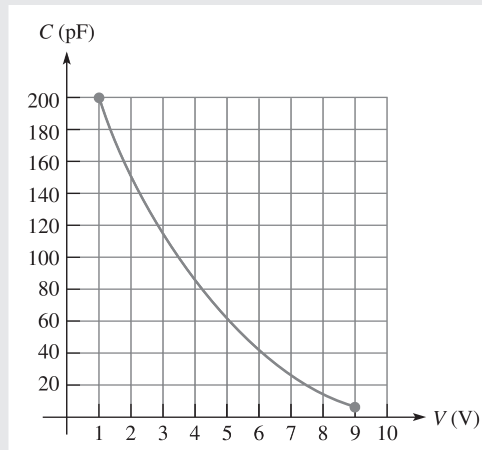


▲ **FIGURA 17–57**

Disposición de un banco de prueba.

▶ FIGURA 17–58

Capacitancia de varactor en función de voltaje.



RESUMEN

- X_L y X_C tienen efectos opuestos en un circuito *RLC*.
- En un circuito *RLC* dispuesto en serie, la reactancia más grande determina la reactancia neta del circuito.
- En condición de resonancia en serie, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales.
- La impedancia de un circuito *RLC* en serie es puramente resistiva en condición de resonancia.
- En un circuito *RLC* en serie, la corriente es máxima en condición de resonancia.
- Los voltajes reactivos V_L y V_C se eliminan en condición de resonancia en un circuito *RLC* en serie porque son iguales en magnitud y están desfasados por 180°.
- En un circuito *RLC* en paralelo, la reactancia más pequeña determina la reactancia neta del circuito.
- En un circuito resonante en paralelo, la impedancia es máxima a la frecuencia resonante.
- Un circuito resonante en paralelo comúnmente se llama *circuito tanque*.
- La impedancia de un circuito *RLC* es puramente resistiva en condición de resonancia.
- El ancho de banda de un circuito resonante en serie es el intervalo de frecuencias al cual la corriente es de $0.707I_{máx}$ o mayor.
- El ancho de banda de un circuito resonante en paralelo es el intervalo de frecuencias para el cual la impedancia es de $0.707Z_{máx}$ o mayor.
- Las frecuencias críticas son las frecuencias ubicadas por encima y por debajo de la condición de resonancia donde la respuesta del circuito es un 70.7% de la respuesta máxima.
- Un factor *Q* alto produce un ancho de banda más angosto.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas incluidos en el capítulo se definen en el glosario que aparece al final del libro.

Circuito tanque Circuito resonante dispuesto en paralelo.

Frecuencia a potencia media Frecuencia a la cual la potencia de salida de un circuito resonante es un 50% de la potencia máxima (el voltaje de salida es el 70.7% del máximo); es también otro nombre para *frecuencia crítica* o *frecuencia de corte*.

Frecuencia resonante Frecuencia a la cual ocurre la resonancia; también es conocida como *frecuencia central*.

Resonancia en paralelo En un circuito *RLC*, condición bajo la cual las reactancias son idealmente iguales y la impedancia es máxima.

Resonancia en serie Condición en un circuito *RLC* en serie en la cual las reactancias idealmente se eliminan y la impedancia es mínima.

Selectividad Es una medida de cuán eficientemente un circuito resonante deja pasar ciertas frecuencias deseadas y rechaza todas las demás. En general, mientras más angosto es el ancho de banda, mayor es la selectividad.

FÓRMULAS

Circuitos *RLC* en serie

17–1 $X_{tot} = |X_L - X_C|$

17–2 $\mathbf{Z} = R + jX_L - jX_C$

17–3 $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \angle \pm\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$

Resonancia en serie

17–4 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

Circuitos *RLC* en paralelo

17–5 $\mathbf{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R\angle 0°} + \frac{1}{X_L\angle 90°} + \frac{1}{X_C\angle -90°}}$

17–6 $\mathbf{G} = \frac{1}{R\angle 0°} = G\angle 0°$

17–7 $\mathbf{B}_C = \frac{1}{X_C\angle -90°} = B_C\angle 90° = jB_C$

17–8 $\mathbf{B}_L = \frac{1}{X_L\angle 90°} = B_L\angle -90° = -jB_L$

17–9 $\mathbf{Y} = \frac{1}{Z\angle \pm\theta} = Y\angle \mp\theta = G + jB_C - jB_L$

17–10 $\mathbf{I}_{tot} = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right)$

Resonancia en paralelo

17–11 $I_{tot} = \frac{V_s}{Z_r}$

17–12 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2 + 1}}$

17–13 $f_r = \frac{\sqrt{1 - (R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$

17–14 $L_{eq} = L\left(\frac{Q^2 + 1}{Q^2}\right)$

17–15 $R_{p(eq)} = R_W(Q^2 + 1)$

17–16 $Z_r = R_W(Q^2 + 1)$

17–17 $Q_O = \frac{R_{p\,(tot)}}{X_{L(eq)}}$

17–18 $AB = f_2 - f_1$

17–19 $f_r = \frac{f_1 + f_2}{2}$

17–20 $AB = \frac{f_r}{Q}$

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. La reactancia total de un circuito *RLC* en serie en condición de resonancia es
(a) de cero **(b)** igual a la resistencia **(c)** infinita **(d)** capacitiva

2. El ángulo de fase entre el voltaje de fuente y la corriente de un circuito *RLC* en serie en condición de resonancia es
(a) $-90°$ **(b)** $+90°$ **(c)** $0°$ **(d)** dependiente de la reactancia

3. La impedancia a la frecuencia resonante de un circuito *RLC* en serie con $L = 15$ mH, $C = 0.015$ μF, y $R_W = 80\ \Omega$ es de
(a) $15\ k\Omega$ **(b)** $80\ \Omega$ **(c)** $30\ \Omega$ **(d)** $0\ \Omega$

4. En un circuito en serie *RLC* que opera por debajo de la frecuencia resonante, la corriente
(a) está en fase con el voltaje aplicado **(b)** se retrasa con respecto al voltaje aplicado
(c) se adelanta al voltaje aplicado

5. Si el valor de *C* en un circuito *RLC* en serie se incrementa, la frecuencia resonante
(a) no se ve afectada **(b)** aumenta **(c)** no cambia **(d)** disminuye

6. En cierto circuito resonante en serie, $V_C = 150$ V, $V_L = 150$ V, y $V_R = 50$ V. El valor del voltaje de fuente es de
(a) 150 V **(b)** 300 V **(c)** 50 V **(d)** 350 V

7. Cierto circuito resonante en serie tiene un ancho de banda de 1 kHz. Si la bobina existente se reemplaza con una de menor valor de *Q*, el ancho de banda
(a) aumentará **(b)** disminuirá **(c)** no cambiará **(d)** será más selectivo

8. A frecuencias por debajo de la frecuencia resonante en un circuito *RLC* en paralelo, la corriente
(a) adelanta al voltaje de fuente **(b)** se retrasa con respecto al voltaje de fuente
(c) está en fase con el voltaje de fuente

9. La corriente total que entra a las ramas *L* y *C* de un circuito en paralelo en condición de resonancia es idealmente
(a) máxima **(b)** baja **(c)** alta **(d)** de cero

10. Para sintonizar un circuito resonante en paralelo a una frecuencia más baja, la capacitancia deberá
(a) incrementarse **(b)** disminuir **(c)** permanecer igual **(d)** ser reemplazada con inductancia

11. La frecuencia resonante de un circuito en paralelo es aproximadamente la misma que la de un circuito en serie cuando
(a) el factor *Q* es muy bajo **(b)** el factor *Q* es muy alto
(c) no hay resistencia **(d)** cualquier respuesta (b) o (c)

12. Si la resistencia en paralelo con un circuito resonante en paralelo se reduce, el ancho de banda
(a) desaparece **(b)** disminuye
(c) se vuelve más marcado **(d)** aumenta

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 17-60.

1. Si R_1 se abre, la corriente total
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

2. Si C_1 se abre, el voltaje en C_2
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

3. Si L_2 se abre, el voltaje entre sus terminales
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 17-63.

4. Si *L* se abre, el voltaje en *R*
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

5. Si f se ajusta a su valor resonante, la corriente a través de R
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 17-64.

6. Si L se incrementa a 100 mH, la frecuencia resonante
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
7. Si C se incrementa a 100 pF, la frecuencia resonante
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
8. Si L se abre, el voltaje en C
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 17-66.

9. Si R_2 se abre, el voltaje en L
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
10. Si C se pone en cortocircuito, el voltaje en R_1
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 17-69.

11. Si L_1 se abre, el voltaje del punto a al punto b
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
12. Si la frecuencia de la fuente se incrementa, el voltaje de a a b
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
13. Si la frecuencia de la fuente de voltaje se incrementa, la corriente a través de R_1
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
14. Si la frecuencia de la fuente de voltaje disminuye, el voltaje en C
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

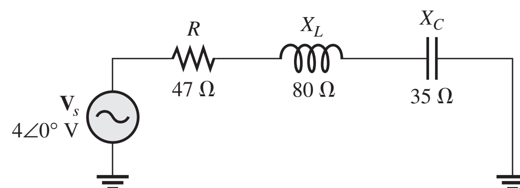
PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

PARTE 1: CIRCUITOS EN SERIE

SECCIÓN 17–1 Impedancia de circuitos *RLC* en serie

1. Cierto circuito *RLC* en serie tiene los siguientes valores: $R = 10\ \Omega$, $C = 0.047\ \mu$F, y $L = 5$ mH. Determine la impedancia en forma polar. ¿Cuál es la reactancia neta? La frecuencia de la fuente es de 5 kHz.
2. Determine la impedancia en la figura 17-59 y exprésela en forma polar.
3. Si en la figura 17-59 la frecuencia del voltaje de fuente se duplica a partir del valor que producen las reactancias indicadas, ¿cómo cambia la magnitud de la impedancia?
4. Para el circuito de la figura 17-59, determine la reactancia neta que hará que la magnitud de la impedancia sea igual a 100 Ω.



▲ FIGURA 17–59

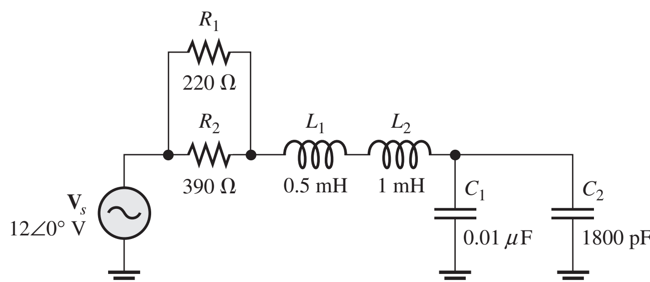
SECCIÓN 17–2 Análisis de circuitos *RLC* en serie

5. Para el circuito de la figura 17-59, determine $\mathbf{I}_{tot}$, $\mathbf{V}_R$, $\mathbf{V}_L$ y $\mathbf{V}_C$ en forma polar.

6. Trace el diagrama fasorial de voltaje para el circuito de la figura 17-59.

7. Analice el circuito de la figura 17-60 para determinar lo siguiente (f = 25 kHz):

(a) $\mathbf{I}_{tot}$ **(b)** P_{real} **(c)** P_r **(d)** P_a



▲ FIGURA 17–60

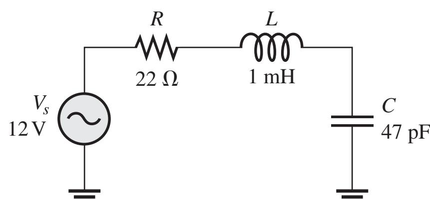
SECCIÓN 17–3 Resonancia en serie

8. Para el circuito de la figura 17-59, ¿es la frecuencia resonante más alta o más baja que el valor indicado por los valores de reactancia?

9. Para el circuito de la figura 17-61, ¿cuál es el voltaje a través de R en condición de resonancia?

10. En la figura 17-61, determine X_L, X_C, Z e I a la frecuencia resonante.

▶ FIGURA 17–61



11. Cierto circuito resonante dispuesto en serie tiene una corriente mínima de 50 mA y un V_L de 100 V. El voltaje aplicado es de 10 V. ¿Cuál es el valor de Z? ¿Cuáles los valores de X_L y X_C?

12. Para el circuito *RLC* de la figura 17-62, determine la frecuencia resonante.

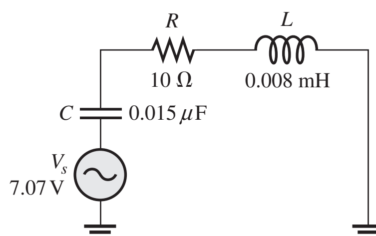
13. Para la figura 17-62, ¿cuál es el valor de la corriente en los puntos de potencia media?

14. En la figura 17-62, determine el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente a las frecuencias críticas. ¿Cuál es el ángulo de fase en condición de resonancia?

***15.** Diseñe un circuito en el cual las siguientes frecuencias resonantes en serie se puedan seleccionar con un conmutador:

(a) 500 kHz **(b)** 1000 kHz **(c)** 1500 kHz **(d)** 2000 kHz

▶ FIGURA 17–62



PARTE 2: CIRCUITOS EN PARALELO

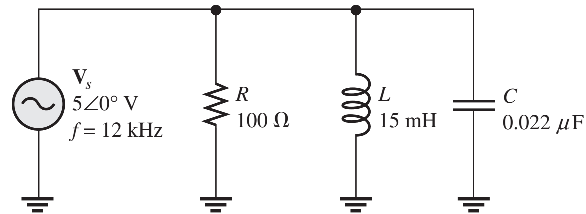
SECCIÓN 17–4 Impedancia de circuitos *RLC* en paralelo

16. Exprese en forma polar la impedancia del circuito de la figura 17-63.

17. ¿Es capacitivo o inductivo el circuito de la figura 17-63? Explique su respuesta.

18. ¿A qué frecuencia el circuito de la figura 17-63 cambia su característica reactiva (de inductiva a capacitiva o viceversa)?

▶ FIGURA 17–63



SECCIÓN 17–5 Análisis de circuitos *RLC* en paralelo

19. Para el circuito de la figura 17-63, determine todas las corrientes y los voltajes en forma polar.

20. Determine la impedancia total del circuito de la figura 17-63 a 50 kHz.

21. Cambie la frecuencia a 100 kHz en la figura 17-63 y repita el problema 19.

SECCIÓN 17–6 Resonancia en paralelo

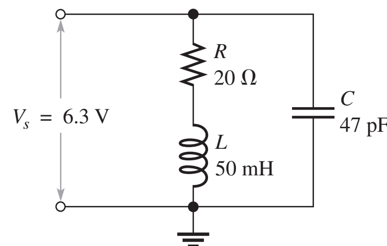
22. ¿Cuál es la impedancia de un circuito resonante ideal dispuesto en paralelo (sin resistencia en las ramas)?

23. Determine Z en condición de resonancia y f_r para el circuito tanque de la figura 17-64.

24. ¿Cuánta corriente se extrae de la fuente de la figura 17-64 en condición de resonancia? ¿Cuáles son las corrientes inductiva y capacitiva en la frecuencia resonante?

25. Determine P_{real}, P_r y P_a en el circuito de la figura 17-64 en condición de resonancia.

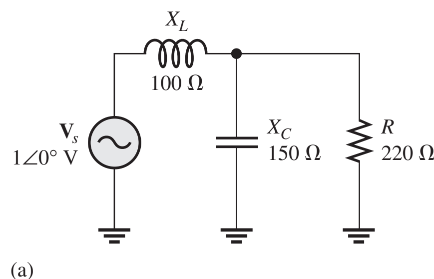
▶ FIGURA 17–64



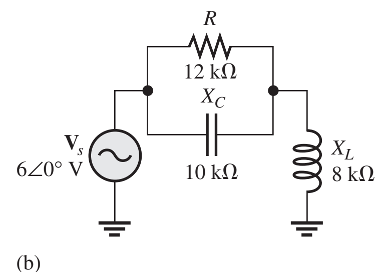
PARTE 3: CIRCUITOS EN SERIE-PARALELO

SECCIÓN 17–7 ANÁLISIS DE CIRCUITOS *RLC* EN SERIE-PARALELO

26. Encuentre la impedancia total para cada circuito de la figura 17-65.



(a)



(b)

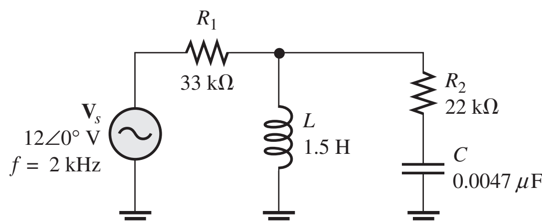
▲ FIGURA 17–65

27. Para cada circuito de la figura 17-65, determine el ángulo de fase entre el voltaje de fuente y la corriente total.

28. Determine el voltaje entre las terminales de cada elemento mostrado en la figura 17-66, y expréselo en forma polar.

29. Convierta el circuito de la figura 17-66 a una forma equivalente dispuesta en serie.

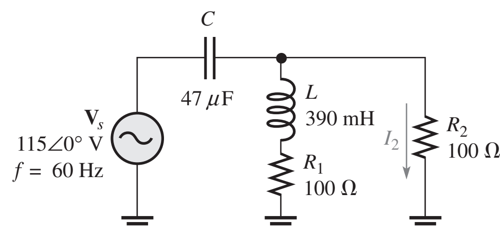
▶ **FIGURA 17–66**



30. ¿Cuál es la corriente a través de R_2 en la figura 17-67?

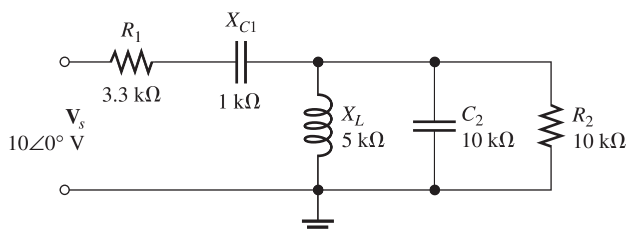
31. En la figura 17-67, ¿cuál es el ángulo de fase entre I_2 y el voltaje de fuente?

▶ **FIGURA 17–67**



***32.** Determine la resistencia y la reactancia totales en la figura 17-68.

* **33.** Determine la corriente a través de cada componente mostrado en la figura 17-68. Encuentre el voltaje entre las terminales de cada componente.

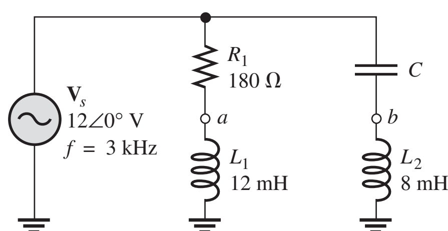


▲ **FIGURA 17–68**

34. Determine si existe un valor de C que hará $V_{ab} = 0$ V en la figura 17-69. Si no lo hay, explique la razón.

***35.** Si el valor de C es de 0.22 μF, ¿cuál es la corriente a través de un resistor de 100 Ω conectado de a a b en la figura 17-69?

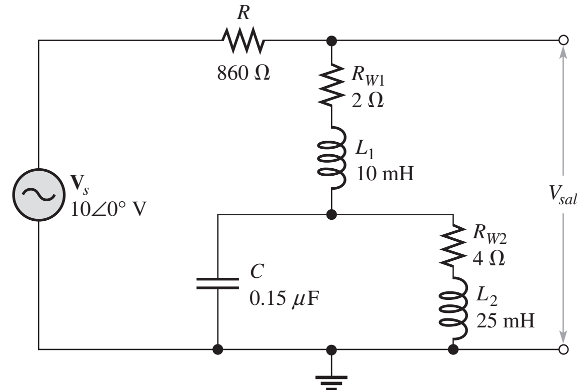
▶ **FIGURA 17–69**



* **36.** ¿Cuántas frecuencias resonantes hay en el circuito de la figura 17-70 ¿Por qué?

* **37.** Determine las frecuencias resonantes y el voltaje de salida en cada frecuencia mostrada en la figura 17-70.

▶ **FIGURA 17–70**



* **38.** Diseñe un red resonante en paralelo usando una sola bobina y capacitores seleccionables mediante un interruptor para producir las siguientes frecuencias resonantes: 8 MHz, 9 MHz, 10 MHz, y 11 MHz. Suponga una bobina de 10 μH con resistencia de devanado de 5 Ω.

PARTE 4: TEMAS ESPECIALES

SECCIÓN 17–8 Ancho de banda de circuitos resonantes

39. En condición de resonancia, $X_L = 2$ kΩ y $R_W = 25$ Ω en un circuito *RLC* en paralelo. La frecuencia resonante es de 5 kHz. Determine el ancho de banda.

40. Si la frecuencia crítica baja es de 2400 Hz y la frecuencia crítica alta es de 2800 Hz, ¿cuál es el ancho de banda? ¿Cuál es la frecuencia resonante?

41. En cierto circuito *RLC*, la potencia en condición de resonancia es de 2.75 W. ¿Cuál es la potencia a la frecuencia crítica baja?

* **42.** En un circuito tanque, ¿qué valores de *L* y *C* deberán utilizarse para obtener una frecuencia resonante de 8 kHz? El ancho de banda debe ser de 800 Hz. La resistencia de devanado del circuito es de 10 Ω.

43. Cierto circuito resonante en paralelo tiene un factor *Q* de 50 y un *AB* de 400 Hz. Si *Q* se duplica, ¿cuál es el ancho de banda a la misma f_r?



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren el uso del CD-ROM Multisim.

44. Abra el archivo P17-44 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

45. Abra el archivo P17-45 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

46. Abra el archivo P17-46 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

47. Abra el archivo P17-47 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

48. Abra el archivo P17-48 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

49. Abra el archivo P17-49 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

50. Abra el archivo P17-50 y determine la frecuencia resonante del circuito.

51. Abra el archivo P17-51 y determine la frecuencia resonante del circuito.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 17–1 Impedancia de circuitos RLC en serie

1. $X_{tot} = 70$ Ω; capacitivo.

2. $\mathbf{Z} = 84.3\angle -56.1°$ Ω; $Z = 84.3$ Ω; $\theta = -56.1°$; la corriente se adelanta a V_s.

SECCIÓN 17–2 Análisis de circuitos *RLC* en serie

1. $\mathbf{V}_s = 38.4\angle -21.3°$ V
2. La corriente se adelanta al voltaje.
3. $X_{tot} = 600\ \Omega$

SECCIÓN 17–3 Resonancia en serie

1. Para resonancia en serie, $X_L = X_C$.
2. La corriente es máxima porque la impedancia es mínima.
3. $f_r = 159$ kHz
4. El circuito es capacitivo.

SECCIÓN 17–4 Impedancia de circuitos *RLC* en paralelo

1. El circuito es capacitivo.
2. $\mathbf{Y} = 1.54\angle 49.4°$ mS
3. $\mathbf{Z} = 651\angle -49.4°\ \Omega$

SECCIÓN 17–5 Análisis de circuitos *RLC* en paralelo

1. $I_R = 80$ mA, $I_C = 120$ mA, $I_L = 240$ mA
2. El circuito es capacitivo.

SECCIÓN 17–6 Resonancia en paralelo

1. La impedancia es máxima en condición de resonancia en paralelo.
2. La corriente es mínima.
3. $X_C = 1500\ \Omega$
4. $f_r = 225$ kHz
5. $f_r = 22.5$ kHz
6. $f_r = 20.9$ kHz

SECCIÓN 17–7 Análisis de circuitos *RLC* en serie-paralelo

1. $R_{p(\text{eq})} = 130\ \Omega$, $L_{\text{eq}} = 101.6\ \mu$H, $C = 0.22\ \mu$F
2. $L_{(\text{eq})} = 20.1$ mH, $R_{p(\text{eq})} = 1.59$ kΩ

SECCIÓN 17–8 Ancho de banda de circuitos resonantes

1. $AB = f_2 - f_1 = 400$ kHz
2. $f_r = 2$ MHz
3. $P_{f2} = 0.9$ W
4. Un factor Q más grande implica un ancho de banda más angosto.

SECCIÓN 17–9 Aplicaciones

1. Se utiliza un filtro sintonizado para seleccionar una banda angosta de frecuencias.
2. Una trampa de ondas es un filtro rechazabandas.
3. La sintonización en grupo se realiza mediante varios capacitores (o inductores) cuyos valores pueden ser variados al mismo tiempo con un control común.

Una aplicación de circuito

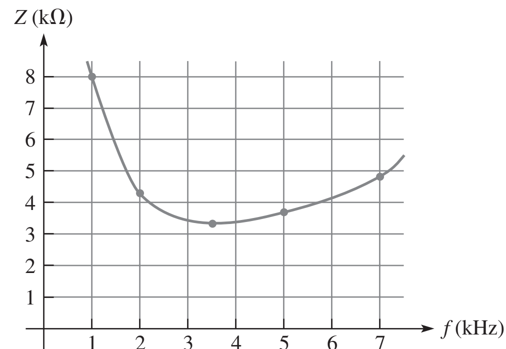
1. El intervalo de la frecuencia de AM va desde 535 kHz hasta 1605 kHz.
2. El amplificador de RF rechaza todas las señales excepto la proveniente de la estación deseada. Luego amplifica la señal seleccionada.
3. Se selecciona una frecuencia de AM en particular variando la capacitancia del varactor con un voltaje de cd.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

17–1 $\mathbf{Z} = 12.7\angle 82.3^\circ$ kΩ

17–2 $\mathbf{Z} = 4.72\angle 45.6^\circ$ kΩ. Vea la figura 17-71.

▶ FIGURA 17–71



17–3 La corriente se incrementará con la frecuencia hasta cierto punto, y luego disminuirá.

17–4 El circuito es más capacitivo.

17–5 $f_r = 22.5$ kHz

17–6 45°

17–7 Z se incrementa; Z se incrementa.

17–8 Z disminuye.

17–9 Inductivo.

17–10 I_{tot} se incrementa.

17–11 Más grande.

17–12 $\mathbf{V}_C = 0.93\angle -65.8^\circ$ V

17–13 $\mathbf{V}_{C1} = 27.1\angle -81.1^\circ$ V

17–14 $R_{p(\text{eq})} = 25$ kΩ, $L_{\text{eq}} = 5$ mH; $C = 0.022$ μF

17–15 $Z_r = 79.9$ kΩ

17–16 $I = 35.4$ mA

17–17 $f_1 = 6.75$ kHz; $f_2 = 9.25$ kHz

17–18 $AB = 7.96$ kHz

AUTOEVALUACIÓN

1. (a) **2.** (c) **3.** (b) **4.** (c) **5.** (d) **6.** (c) **7.** (a) **8.** (b)
9. (d) **10.** (a) **11.** (b) **12.** (d)

EXAMEN RÁPIDO

1. (b) **2.** (a) **3.** (a) **4.** (c) **5.** (c) **6.** (b) **7.** (b) **8.** (c)
9. (a) **10.** (a) **11.** (a) **12.** (a) **13.** (b) **14.** (a)

18 Filtros pasivos

Esquema del capítulo

Objetivos del capítulo

- Analizar la operación de filtros pasabajas *RC* y *RL*
- Analizar la operación de filtros pasaaltas *RC* y *RL*
- Analizar la operación de filtros pasabanda
- Analizar la operación de filtros rechazabanda

Términos clave

- Atenuación
- Curva de Bode
- Década
- Filtro pasaaltas
- Filtro pasabajas
- Filtro pasabanda
- Filtro rechazabanda
- Frecuencia central (f_O)
- Frecuencia crítica (f_c)
- Pasabanda
- Pendiente decreciente (Roll-off)

Descripción previa de una aplicación de circuito

En la aplicación de un circuito, se graficarán las respuestas de filtros a la frecuencia con base en mediciones de osciloscopio y se identificarán los tipos de filtro.

Visite el sitio web relacionado

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

Introducción

El concepto de filtros se introdujo en los capítulos 15, 16 y 17 para ilustrar aplicaciones de circuitos *RC, RL* y *RLC*. Este capítulo es, en esencia, una extensión del material previo y aborda de nuevo el importante tema de los filtros.

Los filtros pasivos se estudian en este capítulo. Los filtros pasivos utilizan varias combinaciones de resistores, capacitores e inductores. En un curso posterior se estudiarán los filtros activos que utilizan componentes pasivos combinados con amplificadores. Ya vimos de qué manera se pueden utilizar los circuitos *RC, RL* y *RLC* básicos como filtros. Ahora, usted aprenderá que los filtros pasivos pueden clasificarse en cuatro categorías generales de acuerdo con sus características de respuesta: pasabajas, pasaaltas, pasabanda y rechazabanda. Dentro de cada categoría, existen varios tipos comunes que serán examinados.

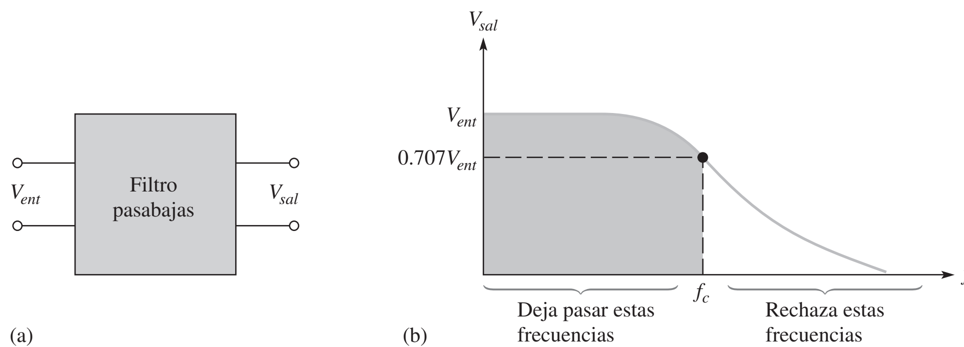
18–1 FILTROS PASABAJAS

Un **filtro pasabajas** deja pasar señales de bajas frecuencias desde la entrada hasta la salida mientras rechaza las frecuencias altas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar la operación de filtros *RC* y *RL* pasabajas**
  - Expresar en decibeles las relaciones de voltaje y potencia de un filtro
  - Determinar la frecuencia crítica de un filtro pasabajas
  - Explicar la diferencia entre curvas de respuesta pasabajas reales e ideales
  - Definir el término pendiente decreciente (*roll-off*)
  - Generar una curva de Bode para un filtro pasabajas
  - Analizar el desplazamiento de fase en un filtro pasabajas

La figura 18-1 muestra un diagrama de bloques y una curva de respuesta general para un filtro pasabajas. El intervalo de frecuencias pasadas por un filtro dentro de límites especificados se llama **banda de paso** del filtro. El punto considerado como extremo superior del intervalo de la banda de paso está en la frecuencia crítica, f_c, como se ilustra en la figura 18-1(b). La **frecuencia crítica (f_c)** es la frecuencia a la cual el voltaje de salida del filtro es un 70.7% del voltaje máximo. La frecuencia crítica del filtro se conoce también como *frecuencia de corte*, *frecuencia de ruptura*, o *frecuencia de* -3 *dB* porque el voltaje de salida se encuentra a 3 dB por debajo de su valor máximo en esta frecuencia. El término *dB* (*decibel*) es una unidad utilizada comúnmente en mediciones con filtros.



▲ **FIGURA 18–1**

Diagrama de bloques para un filtro pasabajas y curva general de respuesta.

Decibeles

La base de la unidad decibel se deriva de la respuesta logarítmica que el oído humano presenta a la intensidad del sonido. El **decibel** es una medida logarítmica de la relación de una potencia a otra y de un voltaje a otro, la cual puede ser utilizada para expresar la relación de entrada a salida de un filtro. La siguiente ecuación expresa una relación de potencia en decibeles:

$$\text{dB} = 10 \log\left(\frac{P_{sal}}{P_{ent}}\right)$$

Ecuación 18–1

A partir de las propiedades de los logaritmos, se deriva la siguiente fórmula de los decibeles para un relación de voltaje.

Ecuación 18–2

$$\text{dB} = 20 \log\left(\frac{V_{sal}}{V_{ent}}\right)$$

EJEMPLO 18–1 A cierta frecuencia, el voltaje de salida de un filtro es de 5 V y el de entrada de 10 V. Exprese la relación de voltaje en decibeles.

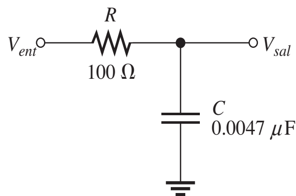
Solución

$$20 \log\left(\frac{V_{sal}}{V_{ent}}\right) = 20 \log\left(\frac{5\text{ V}}{10\text{ V}}\right) = 20 \log(0.5) = \mathbf{-6.02\ dB}$$

Problema relacionado* Exprese la relación $V_{sal}/V_{ent} = 0.85$ en decibeles.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Filtro *RC* pasabajas



▲ FIGURA 18–2

En la figura 18-2 se muestra un filtro *RC* pasabajas. Advierta que el voltaje de salida se toma a través del capacitor.

Cuando la entrada es de cd (0 Hz), el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada porque X_C es infinitamente grande. Conforme se incrementa la frecuencia de entrada, X_C disminuye y, por tanto, V_{sal} disminuye gradualmente hasta que se alcanza una frecuencia a la cual $X_C = R$. Esta es la frecuencia crítica, f_c, del filtro.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_c C} = R$$

Al resolver para f_c,

Ecuación 18–3

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

En cualquier frecuencia, al aplicar la fórmula del divisor de voltaje, la magnitud del voltaje de salida es

$$V_{sal} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent}$$

Como $X_C = R$ en f_c, el voltaje de salida a la frecuencia crítica se expresa como

$$V_{sal} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + R^2}}\right)V_{ent} = \left(\frac{R}{\sqrt{2R^2}}\right)V_{ent} = \left(\frac{R}{R\sqrt{2}}\right)V_{ent} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)V_{ent} = 0.707V_{ent}$$

Estos cálculos comprueban que la salida es el 70.7% de la entrada cuando $X_C = R$. La frecuencia a la cual ocurre esto es, por definición, la frecuencia crítica.

La relación del voltaje de salida al voltaje de entrada en la frecuencia crítica se expresa en decibeles como sigue:

$$V_{sal} = 0.707V_{ent}$$

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = 0.707$$

$$20 \log\left(\frac{V_{sal}}{V_{ent}}\right) = 20 \log(0.707) = -3\text{ dB}$$

EJEMPLO 18–2 Determine la frecuencia crítica para el filtro *RC* pasabajas mostrado en la figura 18-2.

Solución

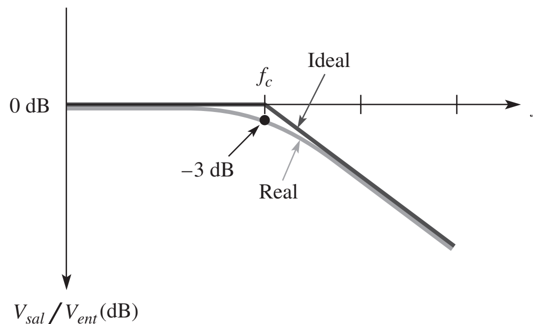
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(100\ \Omega)(0.0047\ \mu\text{F})} = \mathbf{339\ kHz}$$

El voltaje de salida está a 3 dB por debajo de V_{ent} en esta frecuencia (V_{sal} tiene un valor máximo de V_{ent}).

Problema relacionado Un filtro *RC* pasabajas tiene $R = 1.0\ \text{k}\Omega$ y $C = 0.022\ \mu\text{F}$. Determine su frecuencia crítica.

Pendiente decreciente (roll-off) de la curva de respuesta

La línea gris de la figura 18-3 muestra una curva de respuesta real de un filtro pasabajas. La salida máxima es, por definición, de 0 dB como referencia. Cero decibeles corresponde a $V_{sal} = V_{ent}$ porque $20 \log (V_{sal}/V_{ent}) = 20 \log 1 = 0$ dB. La salida disminuye desde 0 dB hasta – 3 dB en la frecuencia crítica y luego continúa disminuyendo a un ritmo fijo. Este patrón de disminución se conoce como **pendiente decreciente** de la respuesta a la frecuencia. La línea gruesa muestra una respuesta de salida ideal considerada "plana" hasta la frecuencia crítica. La salida disminuye luego a un ritmo fijo.



◀ **FIGURA 18–3**

Curvas de respuesta real e ideal para un filtro pasabajas.

Como se ha visto, el voltaje de salida de un filtro pasabajas disminuye en 3 dB cuando la frecuencia se incrementa al valor crítico f_c. Conforme la frecuencia continúa incrementándose por encima de f_c, el voltaje de salida sigue disminuyendo. De hecho, cada vez que la frecuencia se incrementa diez veces por encima de f_c, la salida se reduce en 20 dB, de acuerdo con los siguientes pasos.

Consideremos una frecuencia que es diez veces la frecuencia crítica ($f = 10f_c$). Como $R = X_C$ en f_c, entonces $R = 10X_C$ en $10f_c$ debido a la relación inversa de X_C y f.

La **atenuación** es la reducción del voltaje expresada como la relación de V_{sal}/V_{ent} y se desarrolla como sigue:

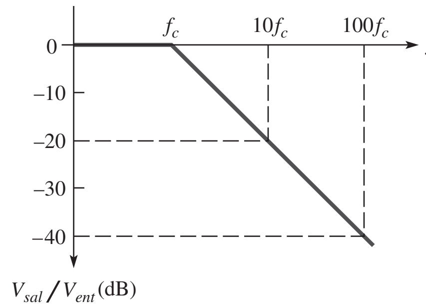
$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{X_C}{\sqrt{(10X_C)^2 + X_C^2}}$$

$$= \frac{X_C}{\sqrt{100X_C^2 + X_C^2}} = \frac{X_C}{\sqrt{X_C^2(100 + 1)}} = \frac{X_C}{X_C\sqrt{101}} = \frac{1}{\sqrt{101}} \cong \frac{1}{10} = 0.1$$

La atenuación en decibeles es

$$20 \log\left(\frac{V_{sal}}{V_{ent}}\right) = 20 \log(0.1) = -20\ \text{dB}$$

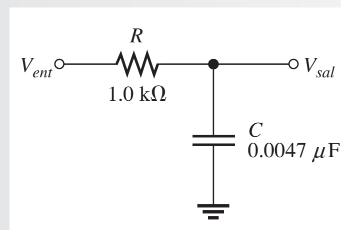
Un cambio de diez veces en la frecuencia se llama **década**. Así que, para un circuito *RC*, el voltaje de salida se reduce en 20 dB por cada incremento de una década en la frecuencia. Se puede derivar un resultado similar para un circuito pasaaltas. La pendiente decreciente es una constante de −20 dB/década para un filtro *RC* o *RL* básico. La figura 18-4 muestra una gráfica de respuesta ideal a la frecuencia en una escala semilogarítmica, donde cada intervalo sobre el eje horizontal representa un incremento de diez veces en la frecuencia. Esta curva de respuesta se llama **curva de Bode.**



▲ **FIGURA 18–4**

Pendiente decreciente de frecuencia contra ganancia de voltaje un filtro *RC* pasabajas (curva de Bode).

EJEMPLO 18–3 Trace una curva de Bode para el filtro de la figura 18-5 para tres décadas de frecuencia. Use papel gráfico semilogarítmico.



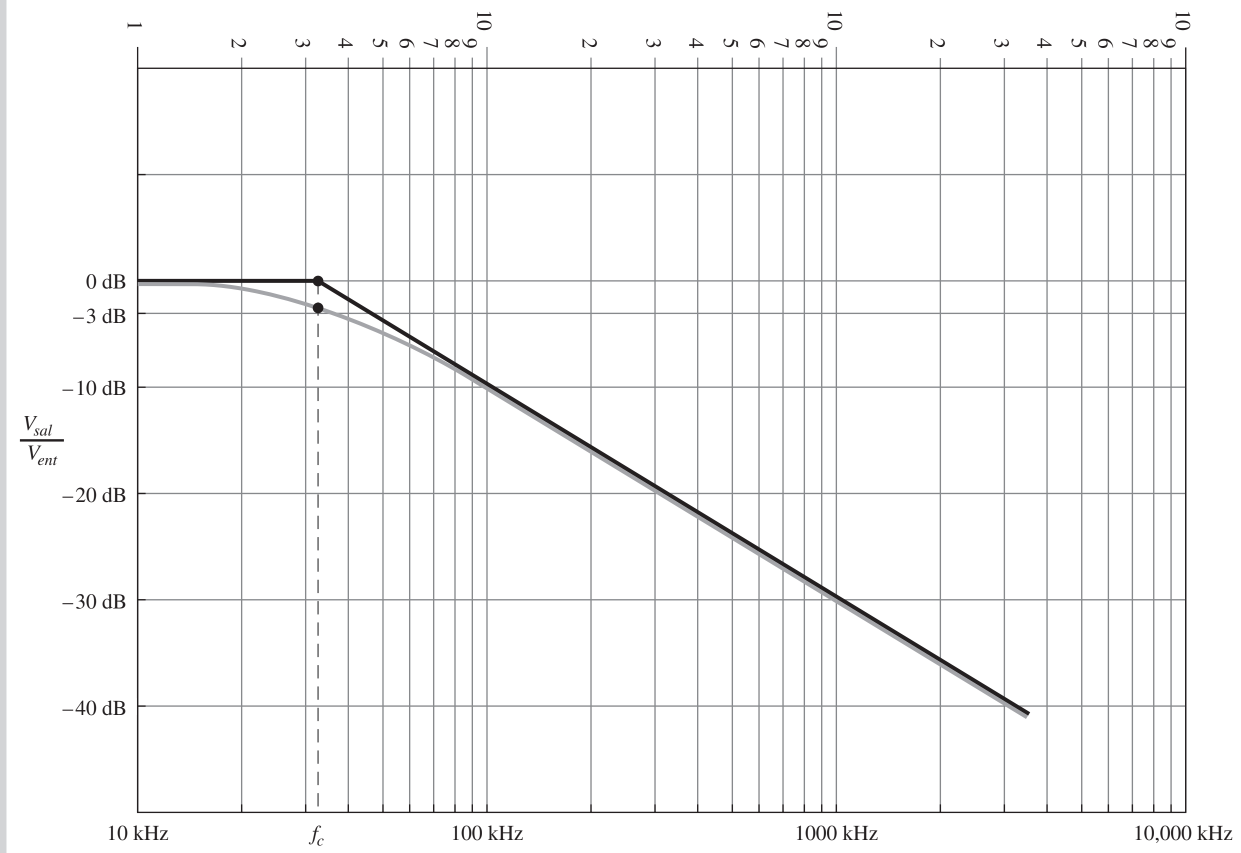
▲ **FIGURA 18–5**

Solución La frecuencia crítica para este filtro pasabajas es

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(1.0\ \text{k}\Omega)(0.0047\ \mu\text{F})} = 33.9\ \text{kHz}$$

En la figura 18-6, la curva de Bode idealizada se muestra mediante la línea gruesa (sólida) en la gráfica semilogarítmica. La curva de respuesta real aproximada se ilustra con la línea gris. Advierta primero que la escala horizontal es logarítmica y la escala vertical es lineal. La frecuencia está en la escala logarítmica y la salida del filtro en decibeles aparece en la escala lineal.

La salida es plana por debajo de f_c (33.9 kHz). Conforme la frecuencia se incrementa por encima de f_c, la salida disminuye a razón de −20 dB/década. Por tanto, para la curva ideal, cada vez que la frecuencia se incrementa en diez veces, la salida se reduce en 20 dB. Una variación leve de esto tiene lugar en la práctica real. La salida ocurre en realidad a −3 dB y no a 0 dB en la frecuencia crítica.



▲ FIGURA 18–6

Curva de Bode para la figura 18-5. La línea sólida representa la curva de respuesta ideal y la línea gris la respuesta real.

Problema relacionado ¿Qué pasa con la frecuencia crítica y la tasa de decrecimiento de la pendiente cuando C se reduce a 0.001 μF en la figura 18-5?

Filtro *RL* pasabajas

La figura 18-7 muestra un filtro *RL* pasabajas básico. Advierta que el voltaje de salida se toma a través del resistor.

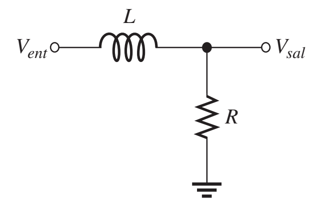
Cuando la entrada es de cd (0 Hz), el voltaje de salida idealmente es igual al voltaje de entrada porque X_L es un corto (si R_W se ignora). Conforme la frecuencia de entrada se incrementa, X_L también lo hace y, por tanto, V_{sal} disminuye gradualmente hasta que se alcanza la frecuencia crítica. En ese momento, $X_L = R$ y la frecuencia es

$$2\pi f_c L = R$$

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi(L/R)}$$

Ecuación 18–4



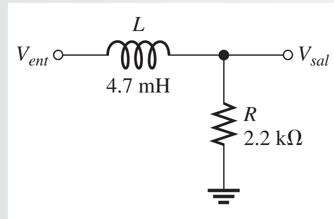
▲ FIGURA 18–7

Filtro *RL* pasabajas.

Exactamente como en el filtro *RC* pasabajas, $V_{sal} = 0.707V_{ent}$ y, por tanto, el voltaje de salida está a –3 dB por debajo del voltaje de entrada en la frecuencia crítica.

EJEMPLO 18–4 Trace una curva de Bode para el filtro de la figura 18-8 para tres décadas de frecuencia. Use papel gráfico semilogarítmico.

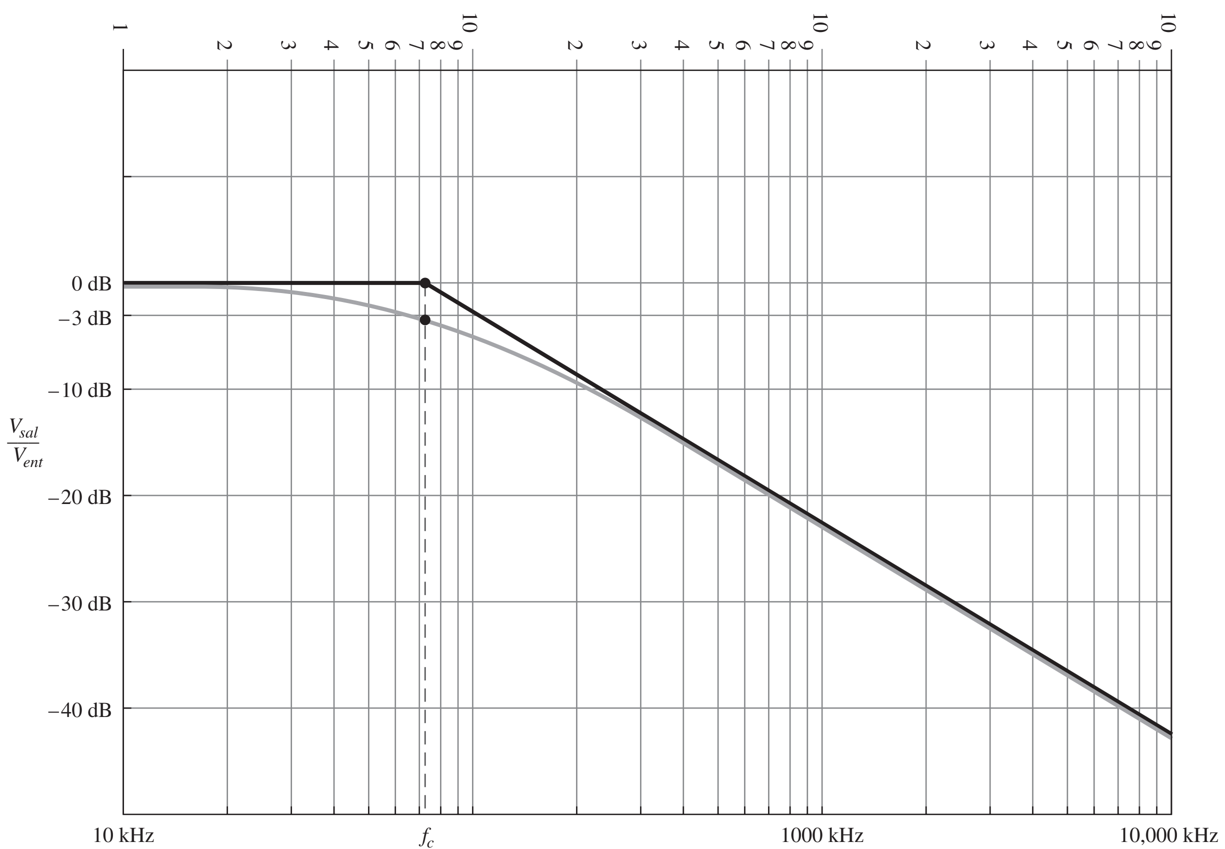
▶ **FIGURA 18–8**



Solución La frecuencia crítica para este filtro pasabajas es

$$f_c = \frac{1}{2\pi(L/R)} = \frac{1}{2\pi(4.7\text{ mH}/2.2\text{ k}\Omega)} = 74.5\text{ kHz}$$

La curva de Bode idealizada se muestra con la línea sólida en la gráfica semilogarítmica de la figura 18-9. La curva de respuesta real aproximada es la línea gris. Advierta, en primer lugar, que la escala horizontal es logarítmica y la escala vertical es lineal. La frecuencia está en la escala logarítmica y la salida del filtro en decibeles en la escala lineal.



▲ **FIGURA 18–9**

Curva de Bode para la figura 18-8. La línea sólida es la curva de respuesta ideal y la línea gris es la respuesta real.

La salida es plana por debajo de f_c (74.5 kHz). Conforme la frecuencia se incrementa por encima de f_c, la salida disminuye a razón de –20 dB/década. Por tanto, para la curva ideal, cada vez que la frecuencia se incrementa en diez veces, la salida se reduce en 20 dB. En la práctica real ocurre una leve variación de esto. La salida tiene lugar en realidad a –3 dB y no a 0 dB en la frecuencia crítica.

Problema relacionado ¿Qué pasa con la frecuencia crítica y la tasa de decrecimiento de la pendiente si L se reduce a 1 mH en la figura 18-8?



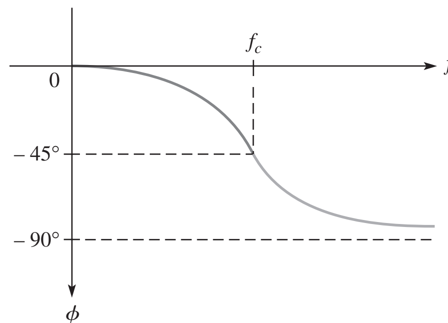
Use el archivo Multisim E18-04 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

Desplazamiento de fase en un filtro pasabajas

El filtro *RC* pasabajas actúa como circuito de retraso. Del capítulo 15, recuerde que el desplazamiento de fase desde la entrada hasta la salida se expresa como

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{R}{X_C}\right)$$

En la frecuencia crítica, $X_C = R$ y, por consiguiente, $\phi = -45°$. Conforme la frecuencia de entrada se reduce, ϕ disminuye y se aproxima a 0° cuando la frecuencia se aproxima a cero. La figura 18-10, ilustra esta característica de fase.



◀ **FIGURA 18–10**

Característica de fase de un filtro pasabajas.

El filtro *RL* pasabajas también actúa como un circuito de retraso. Del capítulo 16, recuerde que el desplazamiento de fase se expresa como

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

Igual que en el filtro *RC*, el desplazamiento de fase desde la entrada hasta la salida es de –45° en la frecuencia crítica y disminuye a frecuencias por debajo de f_c.

REPASO DE LA SECCIÓN 18-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. En cierto filtro pasabajas, $f_c = 2.5$ kHz. ¿Cuál es su banda de paso?
2. En un filtro pasabajas, $R = 100\ \Omega$ y $X_C = 2\ \Omega$ en una frecuencia, f_1. Determine V_{sal} en f_1 cuando $V_{ent} = 5 \angle 0°$ V rms.
3. $V_{sal} = 400$ mV y $V_{ent} = 1.2$ V. Exprese la relación V_{sal}/V_{ent} en dB.

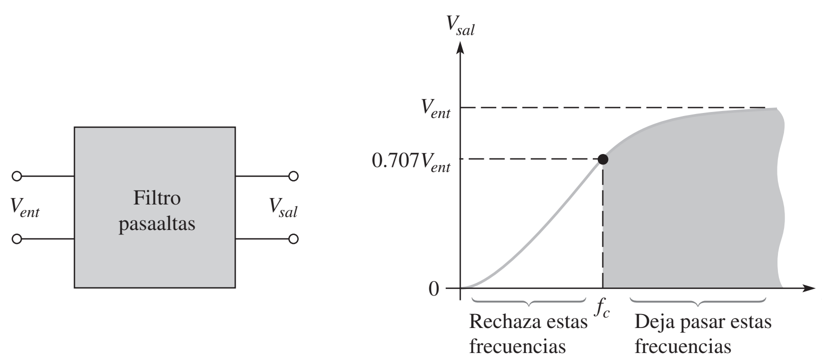
18–2 Filtros pasaaltas

Un **filtro pasaaltas** deja pasar señales de alta frecuencia desde la entrada hasta la salida en tanto que rechaza las señales de baja frecuencia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar la operación de filtros pasaaltas *RC* y *RL***
  - Determinar la frecuencia crítica de un filtro pasaaltas
  - Explicar la diferencia entre curvas de respuesta reales e ideales
  - Generar una curva de Bode para un filtro pasaaltas
  - Examinar el desplazamiento de fase en un filtro pasaaltas

La figura 18-11 muestra un diagrama de bloques y una curva de respuesta general para un filtro pasaaltas. La frecuencia considerada como el extremo inferior de la banda de paso se llama *frecuencia crítica*. Al igual que en el filtro pasabajas, es la frecuencia a la cual la salida es el 70.7% de la frecuencia máxima, como indica la figura.



▲ **FIGURA 18–11**

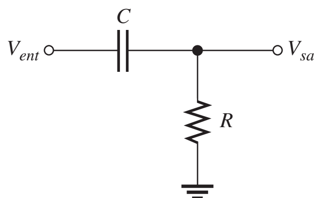
Diagrama de bloques para un filtro pasaaltas y curva de respuesta.

Filtro *RC* pasaaltas

En la figura 18-12 se muestra un filtro *RC* pasaaltas. Advierta que el voltaje de salida se toma a través del resistor.

▶ **FIGURA 18–12**

Filtro *RC* pasaaltas.

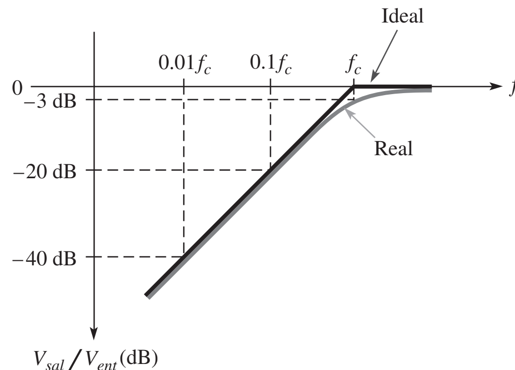


Cuando la frecuencia de entrada alcanza su valor crítico, $X_C = R$ y el voltaje de salida es de $0.707V_{ent}$, como en el caso del filtro pasabajas. Conforme la frecuencia de entrada se incrementa

por encima de la frecuencia crítica, X_C disminuye y, por consiguiente, el voltaje de salida aumenta y tiende a un valor igual a V_{ent}. La expresión para la frecuencia crítica del filtro pasaaltas es la misma que para el filtro pasabajas.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Por debajo de f_c, que el voltaje de salida presenta una pendiente decreciente a razón de 20 dB/década. La figura 18-13 muestra una curva de respuesta real y una curva de respuesta ideal para un filtro pasaaltas.

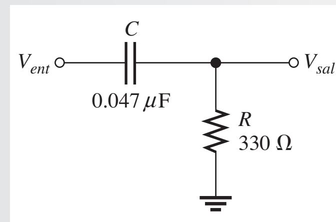


▲ **FIGURA 18–13**

Curvas de respuestas real e ideal para un filtro pasaaltas.

EJEMPLO 18–5 Trace una curva de Bode para el filtro de la figura 18-14 para tres décadas de frecuencia. Use papel gráfico semilogarítmico.

▶ **FIGURA 18–14**

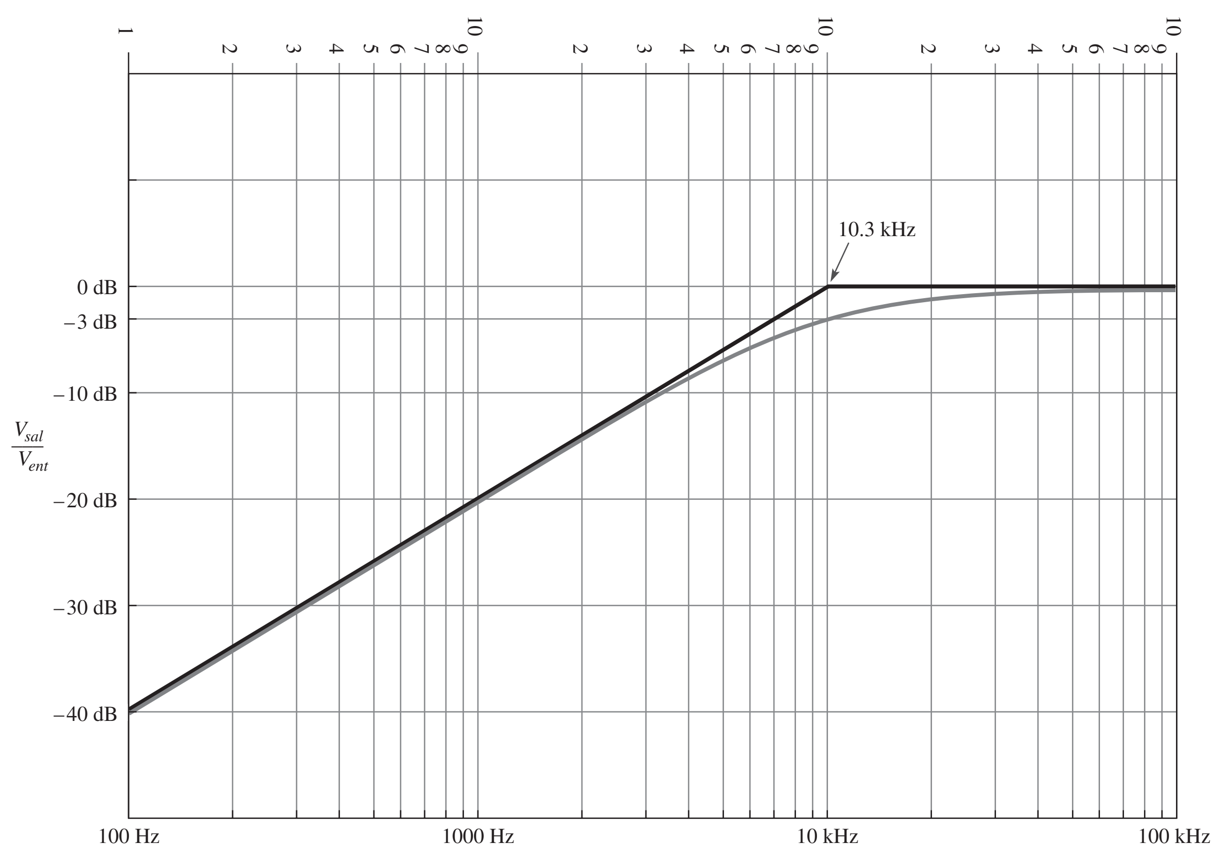


Solución La frecuencia crítica para este filtro pasaaltas es

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(330\ \Omega)(0.047\ \mu\text{F})} = 10.3\ \text{kHz} \cong 10\ \text{kHz}$$

La curva de Bode idealizada se muestra con la línea sólida en papel semilogarítmico en la figura 18-15. La curva de respuesta real aproximada es la línea gris. Advierta, en primer lugar, que la escala horizontal es logarítmica y la escala vertical es lineal. La frecuencia está sobre la escala logarítmica, y la salida del filtro en decibeles está sobre la escala lineal.

La salida es plana por encima de f_c (aproximadamente 10 kHz). Conforme la frecuencia se reduce por debajo de f_c, la salida disminuye a razón de –20 dB/década. Así, en la curva ideal, cada vez que la frecuencia se reduce diez veces, la salida se reduce en 20 dB. En la práctica ocurre una variación leve en esta situación. La salida tiene lugar, en realidad, a –3 dB y no a 0 dB en la frecuencia crítica.



▲ FIGURA 18–15

Curva de Bode para la figura 18-14. La línea sólida es la curva de respuesta ideal y la línea gris es la curva de respuesta real.

Problema relacionado Si la frecuencia del filtro pasaaltas disminuye a 10 Hz, ¿cuál es la relación de la salida a la entrada en decibeles?



Use el archivo Multisim E18-05 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

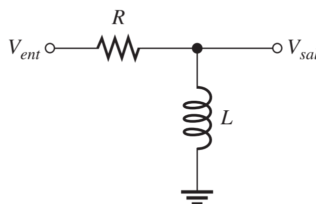
Filtro *RL* pasaaltas

En la figura 18-16 se muestra un filtro *RL* básico pasaaltas. Observe que la salida se toma a través del inductor.

Cuando la frecuencia de salida alcanza su valor crítico, $X_L = R$, y el voltaje de salida es de $0.707V_{ent}$. Conforme la frecuencia se incrementa por encima de f_c, X_L aumenta y, por consiguiente,

▶ FIGURA 18–16

Filtro *RL* pasaaltas.



el voltaje de salida aumenta hasta que es igual a V_{ent}. La expresión para la frecuencia crítica de un filtro pasaaltas es la misma que para el filtro pasabajas.

$$f_c = \frac{1}{2\pi(L/R)}$$

Desplazamiento de fase en un filtro pasaaltas

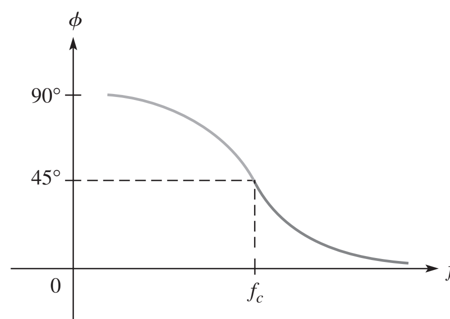
Tanto los filtros *RC* pasaaltas como los filtros *RL* pasaaltas actúan como circuitos de adelanto. De los capítulos 15 y 16, recordemos que para el circuito *RC* de adelanto el desplazamiento de fase desde la entrada hasta la salida es

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

y el desplazamiento de fase para el circuito *RL* de adelanto es

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R}{X_L}\right)$$

En la frecuencia crítica, $X_L = R$ y, por consiguiente, $\phi = 45°$. Conforme se incrementa la frecuencia, ϕ tiende a 0°, según muestra la figura 18-17.



◀ **FIGURA 18–17**

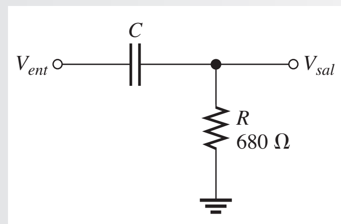
Característica de fase de un filtro pasaaltas.

EJEMPLO 18–6

(a) En la figura 18-18, encuentre el valor de *C* de modo que X_C sea diez veces menor que *R* en una frecuencia de salida de 10 kHz.

(b) Si se aplica una onda seno de 5 V con un nivel de cd de 10 V, ¿cuáles son la magnitud del voltaje de salida y el desplazamiento de fase?

▶ **FIGURA 18–18**



Solución **(a)** Determine el valor de *C* como sigue:

$$X_C = 0.1R = 0.1(680\ \Omega) = 68\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(68\ \Omega)} = \mathbf{0.234\ \mu F}$$

El valor estándar de *C* más cercano es de 0.22 μF.

(b) Determine la magnitud de la salida sinusoidal como sigue:

$$V_{sal} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{ent} = \left(\frac{680\ \Omega}{\sqrt{(680\ \Omega)^2 + (68\ \Omega)^2}}\right)5\text{ V} = \mathbf{4.98\ V}$$

El desplazamiento de fase es

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{68\ \Omega}{680\ \Omega}\right) = \mathbf{5.7°}$$

En f = 10 kHz, la cual es una década sobre la frecuencia crítica, la salida sinusoidal es casi igual a la entrada en magnitud, y el desplazamiento de fase es muy pequeño. El nivel de cd de 10 V fue filtrado y no aparece a la salida.

Problema relacionado Repita las partes (a) y (b) del ejemplo si R cambia a 220 Ω.



Use el archivo Multisim E18-06 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar sus cálculos en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 18-2

1. **El voltaje de entrada de un filtro pasaaltas es de 1 V. ¿Cuál es V_{sal} a la frecuencia crítica?**
2. **En cierto filtro pasaaltas, $V_{ent} = 10 \angle 0°$ V, R = 1.0 kΩ, y X_L = 15 kΩ. Determine V_{sal}.**

18–3 FILTROS PASABANDA

Un filtro **pasabanda** deja pasar cierta banda de frecuencias y atenúa o rechaza todas las frecuencias por debajo y por encima de la banda de paso.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar la operación de filtros pasabanda**
  - Definir el término *ancho de banda*
  - Mostrar cómo se implementa un filtro pasabanda con filtros pasabajas y filtros pasaaltas
  - Explicar el concepto de filtro pasabanda resonante en serie
  - Explicar el concepto de filtro pasabanda resonante en paralelo
  - Calcular el ancho de banda y el voltaje de salida de un filtro pasabanda

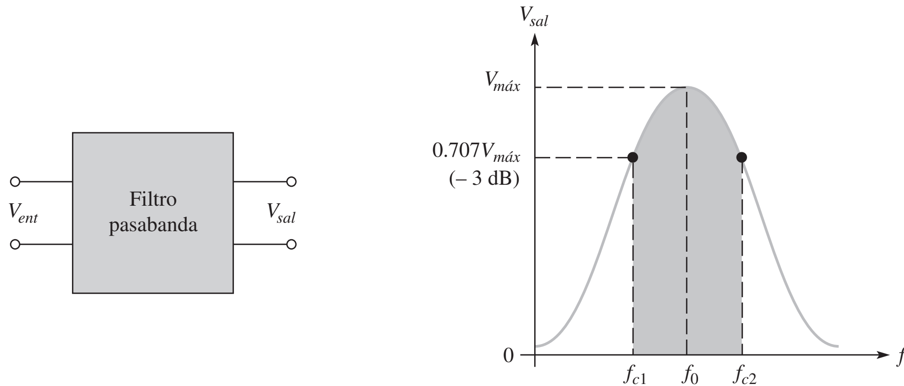
El ancho de banda de un filtro pasabanda es el intervalo de frecuencias dentro del cual la corriente, y por tanto el voltaje de salida, es igual o mayor que el 70.7% de su valor en la frecuencia de resonancia.

Como se sabe, el ancho de banda a menudo se abrevia AB y se calcula como

$$AB = f_{c2} - f_{c1}$$

donde f_{c1} es la frecuencia de corte baja y f_{c2} es la frecuencia de corte alta.

La figura 18-19 muestra una curva típica de respuesta pasabanda.

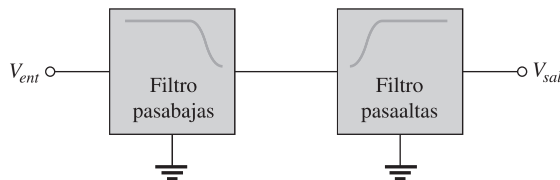


▲ **FIGURA 18–19**

Curva típica de respuesta de un filtro pasabanda.

Filtro pasabajas/pasaaltas

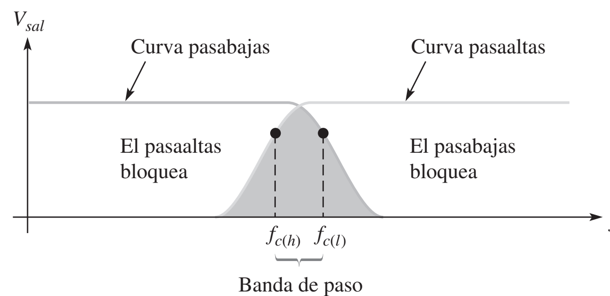
Se puede utilizar la combinación de un filtro pasabajas y un filtro pasaaltas para formar un filtro pasabanda, como ilustra la figura 18-20. El efecto de carga del segundo filtro sobre el primero debe ser tomado en cuenta.



◀ **FIGURA 18–20**

Un filtro pasabajas y un filtro pasaaltas se utilizan para formar un filtro pasabanda.

Si la frecuencia crítica del filtro pasabajas, $f_{c(l)}$, es más alta que la frecuencia crítica del filtro pasaaltas, $f_{c(h)}$, las respuestas se traslapan. Por tanto, todas las frecuencias excepto aquellas entre $f_{c(h)}$ y $f_{c(l)}$ son eliminadas, como se muestra en la figura 18-21.



◀ **FIGURA 18–21**

Curvas traslapadas de respuesta de un filtro pasabajas/pasaaltas.

EJEMPLO 18–7 Se utiliza un filtro pasaaltas con $f_c = 2$ kHz y un filtro pasabajas con $f_c = 2.5$ kHz para construir un filtro pasabanda. Suponiendo que no hay efecto de carga, ¿cuál es el ancho de banda de la banda de paso?

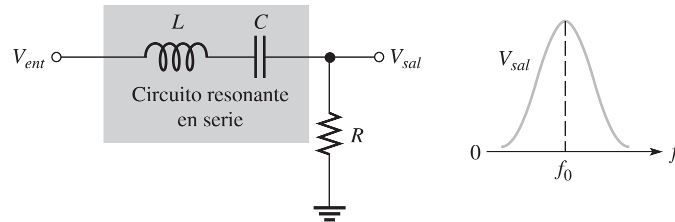
Solución

$$AB = f_{c(l)} - f_{c(h)} = 2.5\text{ kHz} - 2\text{ kHz} = \mathbf{500\ Hz}$$

Problema relacionado Si $f_{c(l)} = 9$ kHz y el ancho de banda es de 1.5 kHz, ¿cuál es $f_{c(h)}$?

Filtro pasabanda resonante en serie

La figura 18-22 muestra un tipo de filtro pasabanda resonante dispuesto en serie. Como se aprendió en el capítulo 17, un circuito resonante en serie tiene impedancia mínima y corriente máxima en la frecuencia resonante, f_r. Así, la mayor parte del voltaje de entrada disminuye a través del resistor en la frecuencia de resonancia. Por consiguiente, la salida a través de R tiene una característica pasabanda con una salida máxima en la frecuencia de resonancia. La frecuencia resonante se llama **frecuencia central, f_0**. El factor de calidad Q del circuito y la frecuencia resonante determinan el ancho de banda, tal como se vio en el capítulo 17. Recuerde que $Q = X_L/R$.



▲ FIGURA 18–22

Filtro pasabanda resonante en serie.

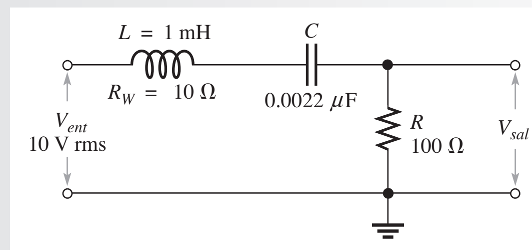
Un valor alto de Q produce un ancho de banda más pequeño. Un valor bajo de Q produce un ancho de banda más grande. En la siguiente ecuación se establece una fórmula para determinar el ancho de banda de un circuito resonante en función de Q:

Ecuación 18–5

$$AB = \frac{f_0}{Q}$$

EJEMPLO 18–8 Determine la magnitud del voltaje de salida en la frecuencia central (f_0) y el ancho de banda para el filtro de la figura 18-23.

▶ FIGURA 18–23



Solución En f_0, la impedancia del circuito resonante es igual a la resistencia de devanado, R_W. Según la fórmula del divisor de voltaje,

$$V_{sal} = \left(\frac{R}{R + R_W}\right)V_{ent} = \left(\frac{100\ \Omega}{110\ \Omega}\right)10\text{ V} = \mathbf{9.09\ V}$$

La frecuencia central es

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1\text{ mH})(0.0022\ \mu\text{F})}} = 107\text{ kHz}$$

En f_0, la reactancia inductiva es

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(107\text{ kHz})(1\text{ mH}) = 672\ \Omega$$

y la resistencia total es

$$R_{tot} = R + R_W = 100\ \Omega + 10\ \Omega = 110\ \Omega$$

Por consiguiente, el factor Q del circuito es

$$Q = \frac{X_L}{R_{tot}} = \frac{672\ \Omega}{110\ \Omega} = 6.11$$

El ancho de banda es

$$AB = \frac{f_0}{Q} = \frac{107\text{ kHz}}{6.11} = \mathbf{17.5\ kHz}$$

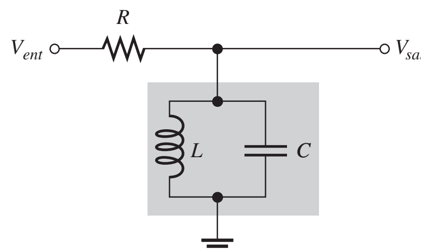
Problema relacionado Si una bobina de 1 mH con resistencia de devanado de 18 Ω reemplaza a la bobina existente en la figura 18-23, ¿cómo se ve afectado el ancho de banda?



Use el archivo Multisim E18-08 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su respuesta en el problema relacionado.

Filtro pasabanda resonante en paralelo

La figura 18-24 muestra un circuito resonante dispuesto en paralelo que utiliza un tipo de filtro pasabanda. Recordemos que un circuito resonante en paralelo tiene impedancia máxima en condición de resonancia. El circuito de la figura 18-24 actúa como un divisor de voltaje. Bajo condición de resonancia, la impedancia de un circuito tanque es mucho más grande que la resistencia. Por tanto, la mayor parte del voltaje de entrada está en el circuito tanque, de modo que se produce un voltaje de salida máximo en la frecuencia de resonancia (central).



◀ **FIGURA 18–24**

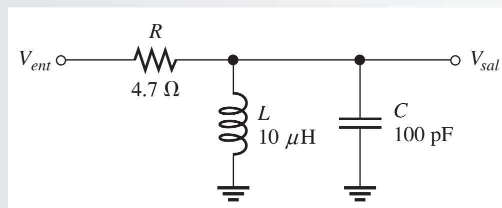
Filtro pasabanda resonante en paralelo.

En frecuencias sobre o bajo la frecuencia de resonancia, la impedancia del circuito tanque se reduce y más del voltaje de entrada está en R. Por consiguiente, el voltaje de salida entre las terminales del circuito tanque disminuye y se crea una característica pasabanda.

EJEMPLO 18–9

¿Cuál es la frecuencia central del filtro de la figura 18-25? Suponga $R_W = 0\ \Omega$.

▶ **FIGURA 18–25**



Solución La frecuencia central del filtro es su frecuencia resonante.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(10\ \mu\text{H})(100\ \text{pF})}} = \mathbf{5.03\ MHz}$$

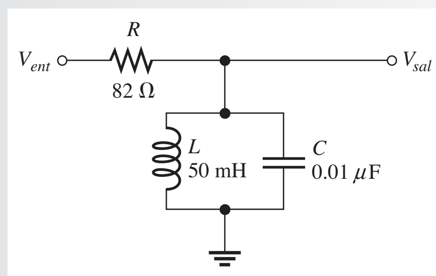
Problema relacionado En la figura 18-25, determine f_0 cuando C cambia a 1000 pF.



Use el archivo Multisim E18-09 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 18–10 Determine la frecuencia central y el ancho de banda del filtro pasabanda mostrado en la figura 18-26 si la resistencia de devanado del inductor es de 15 Ω.

▶ **FIGURA 18–26**



Solución Del capítulo 17 (Ec. 17-13), recuerde que la frecuencia resonante (central) de un circuito tanque no ideal es

$$f_0 = \frac{\sqrt{1 - (R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{1 - (15\ \Omega)^2(0.01\ \mu\text{F})/50\ \text{mH}}}{2\pi\sqrt{(50\ \text{mH})(0.01\mu\text{F})}} = \mathbf{7.12\ kHz}$$

El factor Q de la bobina a frecuencia resonante es

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{2\pi f_0 L}{R_W} = \frac{2\pi(7.12\ \text{kHz})(50\ \text{mH})}{15\ \Omega} = 149$$

El ancho de banda del filtro es

$$AB = \frac{f_0}{Q} = \frac{7.12\ \text{kHz}}{149} = \mathbf{47.8\ Hz}$$

Observe que como $Q > 10$, la fórmula más simple, $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, podría haber sido utilizada para calcular f_0.

Problema relacionado Dado que ya conoce el valor de Q, calcule otra vez f_0 empleando la fórmula más simple.

REPASO DE LA SECCIÓN 18-3

1. Para un filtro pasabanda, $f_{c(h)}$ 5 29.8 kHz y $f_{c(l)}$ 5 30.2 kHz. ¿Cuál es el ancho de banda?
2. Un filtro pasabanda resonante dispuesto en paralelo tiene los siguientes valores: $R_W = 15\ \Omega$, $L = 50\ \mu$H, y $C = 470$ pF. Determine la frecuencia central aproximada.

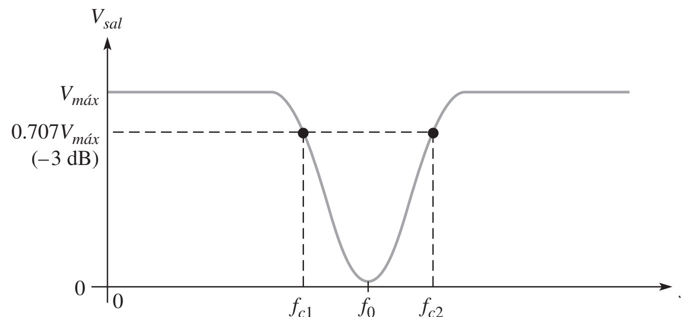
18–4 FILTROS RECHAZABANDA

Un filtro rechazabanda es, en esencia, lo opuesto de un filtro pasabanda en función de las respuestas. Un **filtro rechazabanda** deja pasar todas las frecuencias excepto aquellas que quedan dentro de cierta banda de rechazo.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar la operación de fitros rechazabanda**
  - Mostrar cómo se implementa un filtro rechazabanda con filtros pasabajas y pasaaltas
  - Explicar el concepto de filtro rechazabanda resonante en serie
  - Explicar el concepto de filtro rechazabanda resonante en paralelo
  - Calcular el ancho de banda y el voltaje de salida de un filtro rechazabanda

La figura 18-27 muestra una curva general de respuesta de un filtro rechazabanda.

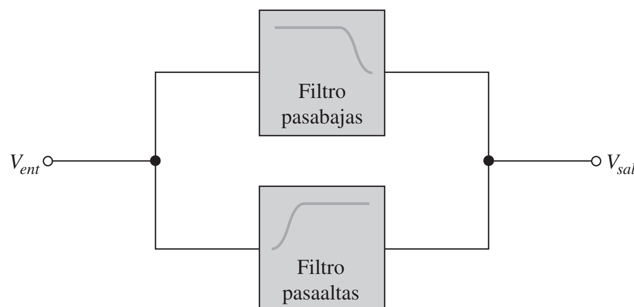


▲ FIGURA 18–27

Curva general de respuesta rechazabanda.

Filtro pasabajas/pasaaltas

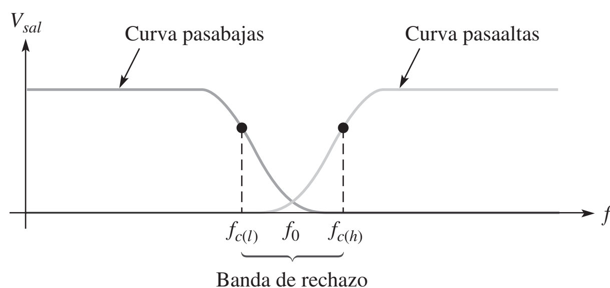
Se puede formar un filtro rechazabanda con un filtro pasabajas y un filtro pasaaltas, como indica la figura 18-28.



▲ FIGURA 18–28

Se utiliza un filtro pasabajas y un filtro pasaaltas para formar un filtro rechazabanda.

Si la frecuencia crítica pasabajas, $f_{c(l)}$, se ajusta más baja que la frecuencia crítica pasaaltas, $f_{c(h)}$, se forma una característica rechazabanda tal como ilustra la figura 18-29.

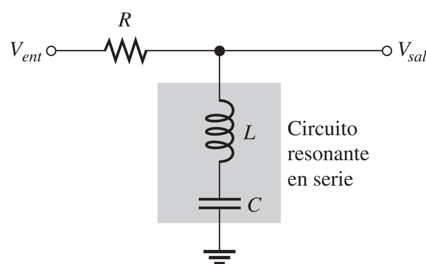


▲ **FIGURA 18–29**

Curva de respuesta rechazabanda.

Filtro rechazabanda resonante en serie

La figura 18-30 muestra un circuito resonante dispuesto en serie en una configuración rechazabanda. Básicamente, esta configuración funciona como sigue: en la frecuencia resonante, la impedancia es mínima y, por consiguiente, el voltaje de salida es mínimo. La mayor parte del voltaje de entrada disminuye a través de *R*. En frecuencias sobre y bajo la frecuencia de resonancia la impedancia se incrementa, lo cual provoca más voltaje en la salida.

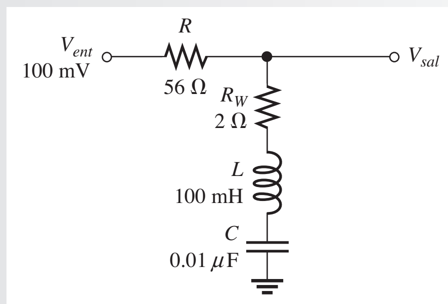


▲ **FIGURA 18–30**

Filtro rechazabanda resonante en serie.

EJEMPLO 18–11 Encuentre la magnitud del voltaje de salida en f_0 y el ancho de banda en la figura 18-31.

▶ **FIGURA 18–31**



Solución Como $X_L = X_C$ en condición de resonancia, el voltaje de salida es

$$V_{sal} = \left(\frac{R_W}{R + R_W}\right)V_{ent} = \left(\frac{2\ \Omega}{58\ \Omega}\right)100\text{ mV} = \mathbf{3.45\ mV}$$

Para determinar el ancho de banda, calcule primero la frecuencia central y el factor Q del circuito.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100 \text{ mH})(0.01 \ \mu\text{F})}} = 5.03 \text{ kHz}$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi fL}{R} = \frac{2\pi(5.03 \text{ kHz})(100 \text{ mH})}{58 \ \Omega} = \frac{3.16 \text{ k}\Omega}{58 \ \Omega} = 54.5$$

$$AB = \frac{f_0}{Q} = \frac{5.03 \text{ kHz}}{54.5} = \mathbf{92.3 \text{ Hz}}$$

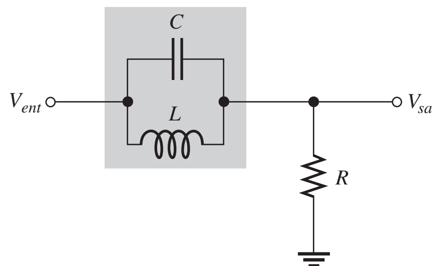
Problema relacionado Suponga $R_W = 10 \ \Omega$ en la figura 18-31. Determine V_{sal} y el ancho de banda.



Use el archivo Multisim E18-11 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Filtro rechazabanda resonante en paralelo

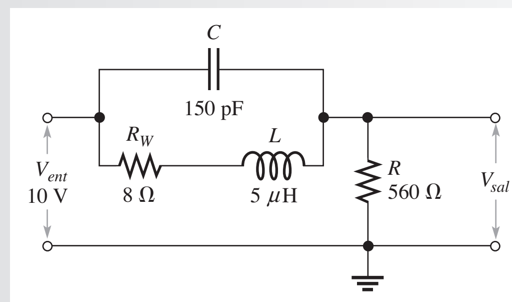
La figura 18-32 muestra un circuito resonante dispuesto en paralelo utilizado en una configuración rechazabanda. En la frecuencia resonante, la impedancia del circuito tanque es máxima, y por tanto la mayor parte del voltaje de entrada aparece a través de él. Muy poco voltaje aparece en R en condición de resonancia. Conforme la impedancia del circuito tanque disminuye sobre y bajo la frecuencia de resonancia, el voltaje de salida aumenta.



◀ **FIGURA 18–32**

Filtro rechazabanda resonante en paralelo.

EJEMPLO 18–12 Determine la frecuencia central del filtro mostrado en la figura 18-33. Trace la curva de respuesta de salida que muestre los voltajes mínimo y máximo.



▲ **FIGURA 18–33**

Solución La frecuencia central es

$$f_0 = \frac{\sqrt{1 - R_W^2 C/L}}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{1 - (8\ \Omega)^2(150\ \text{pF})/5\ \mu\text{H}}}{2\pi\sqrt{(5\ \mu\text{H})(150\ \text{pF})}} = \mathbf{5.79\ MHz}$$

En la frecuencia central (resonante),

$$X_L = 2\pi f_0 L = 2\pi(5.79\ \text{MHz})(5\ \mu\text{H}) = 182\ \Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{182\ \Omega}{8\ \Omega} = 22.8$$

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1) = 8\ \Omega(22.8^2 + 1) = 4.17\ \text{k}\Omega$$

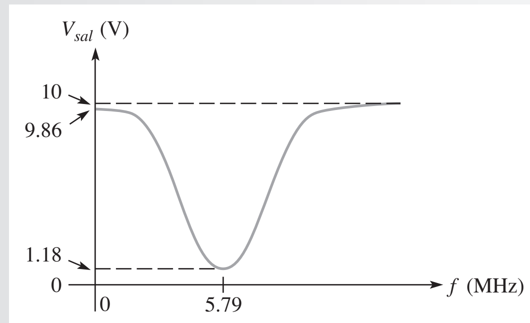
A continuación, use la fórmula del divisor de voltaje para determinar la magnitud del voltaje de salida mínimo.

$$V_{sal(mín)} = \left(\frac{R}{R + Z_r}\right)V_{ent} = \left(\frac{560\ \Omega}{4.73\ \text{k}\Omega}\right)10\ \text{V} = 1.18\ \text{V}$$

En la frecuencia cero, la impedancia del circuito tanque es R_W porque $X_C = \infty$ y $X_L = 0\ \Omega$. Por consiguiente, el voltaje de salida máximo por debajo de la condición de resonancia es

$$V_{sal(máx)} = \left(\frac{R}{R + R_W}\right)V_{ent} = \left(\frac{560\ \Omega}{568\ \Omega}\right)10\ \text{V} = 9.86\ \text{V}$$

Conforme la frecuencia se incrementa hasta un valor mucho más alto que f_0, X_C tiende a 0 Ω, y V_{sal} tiende a V_{ent}(10 V). La figura 18-34 muestra la curva de respuesta.



▲ **FIGURA 18–34**

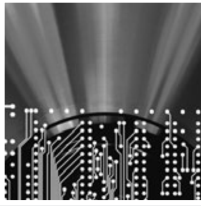
Problema relacionado En la figura 18-33, ¿cuál es el voltaje de salida mínimo si $R = 1.0\ \text{k}\Omega$?



Use el archivo Multisim E18-12 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 18-4

1. ¿Cómo difiere un filtro rechazabanda de un filtro pasabanda?
2. Enuncie tres formas básicas de construir un filtro rechazabanda.

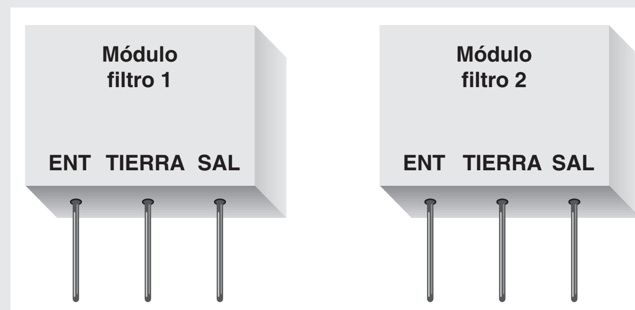


Una aplicación de circuito

En esta aplicación de circuito, usted trazará las respuestas a la frecuencia de dos tipos de filtro basándose en una serie de mediciones realizadas con el osciloscopio, e identificará el tipo de filtro en cada caso. Los filtros están contenidos en módulos sellados, como indica la figura 18-35. Sólo interesa determinar las características de respuesta del filtro y no los tipos de componentes internos.

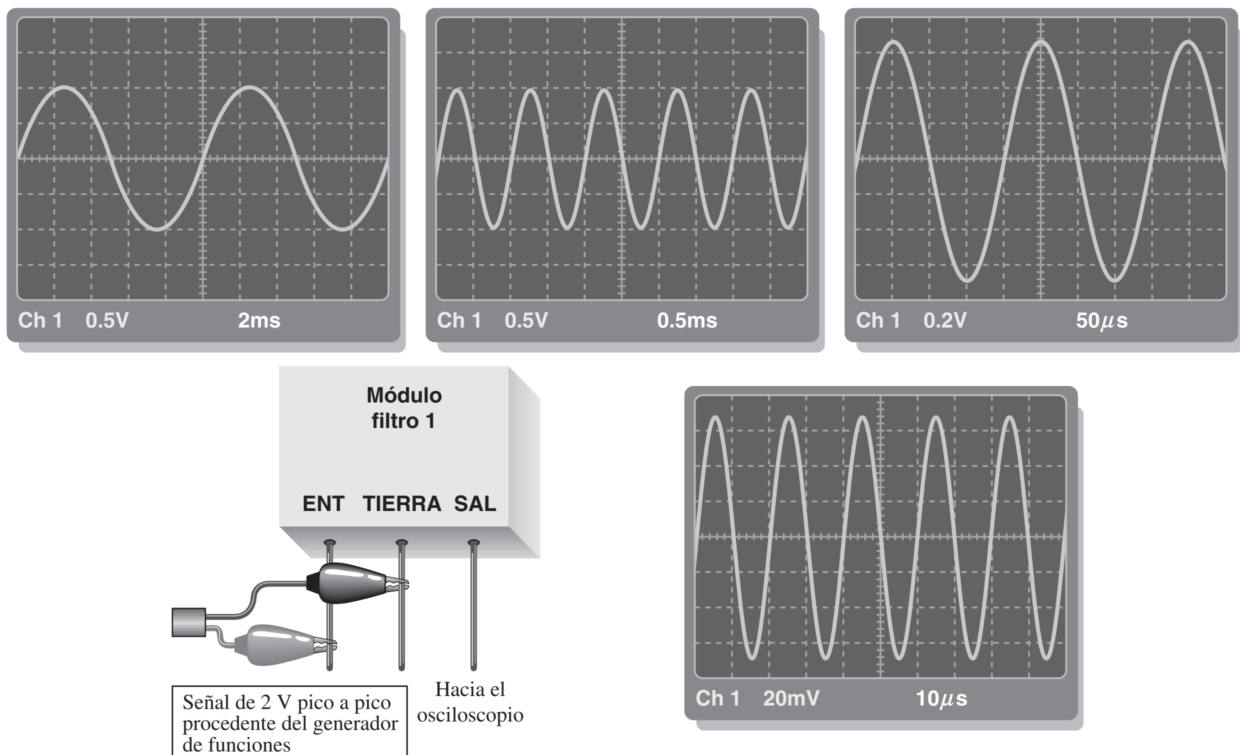
Medición y análisis de un filtro

- Consulte la figura 18-36. Con base en la serie de cuatro mediciones realizadas con un osciloscopio, trace una curva de Bode del filtro sometido a prueba, especifique las frecuencias aplicables e identifique el tipo de filtro.
- Consulte la figura 18-37. Con base en la serie de seis mediciones realizadas con un osciloscopio, trace una curva de Bode del filtro sometido a prueba, especifique las frecuencias aplicables e identifique el tipo de filtro.

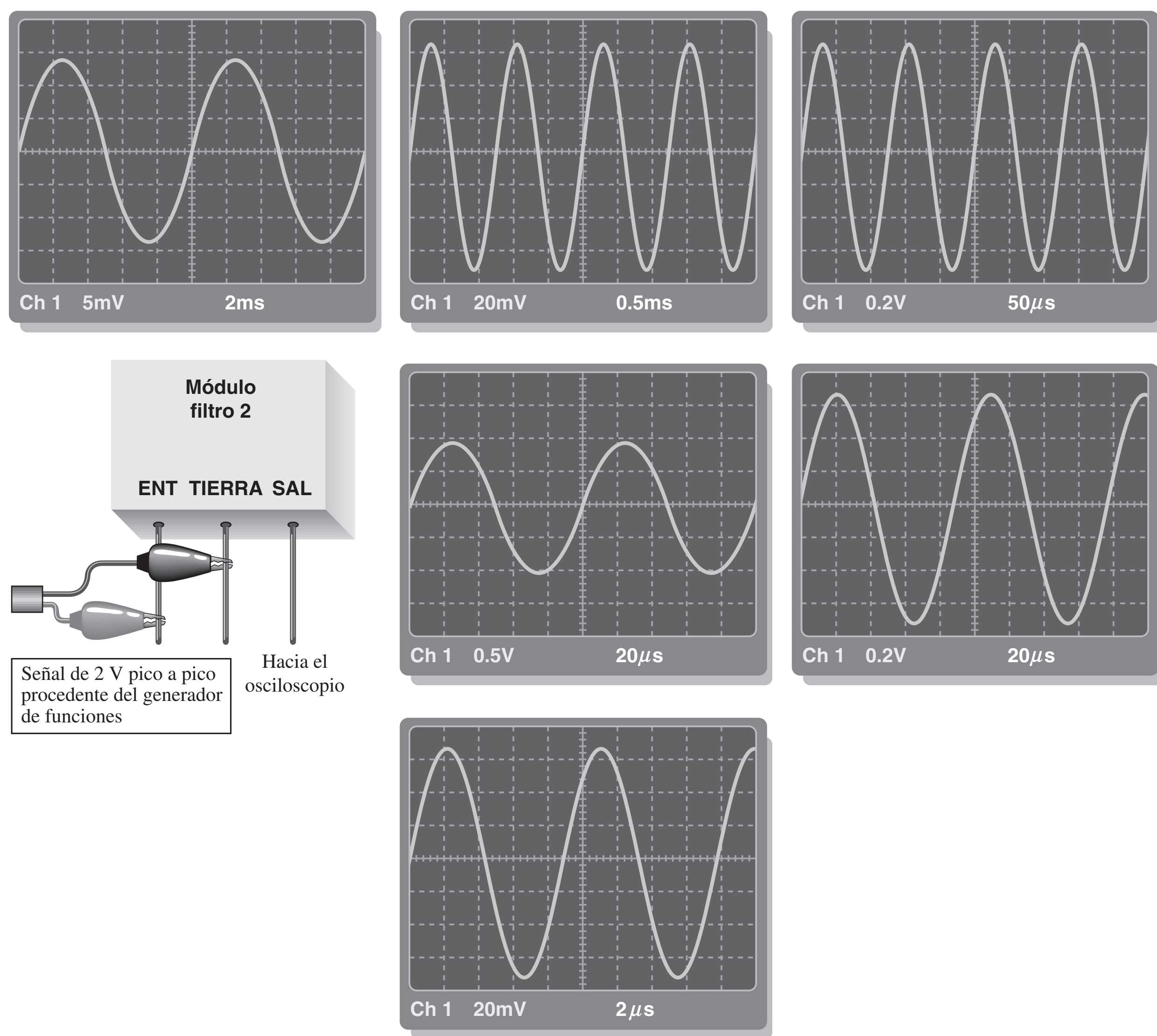


◄ FIGURA 18–35

Módulos filtro.



▲ FIGURA 18–36



▲ FIGURA 18–37

Repaso

1. Explique cómo las formas de onda de la figura 18-36 indican el tipo de filtro.
2. Explique cómo las formas de onda de la figura 18-37 indican el tipo de filtro.

RESUMEN

- Cuatro categorías de filtros pasivos, de acuerdo con sus características de respuesta, son: pasabajas, pasaaltas, pasabanda y rechazabanda.
- En un filtro *RC* pasabajas, el voltaje de salida se toma a través del capacitor y la salida se retrasa con respecto a la entrada.
- En un filtro *RL* pasabajas, el voltaje de salida se toma a través del resistor y la salida se retrasa con respecto a la entrada.

- En un filtro *RC* pasaaltas, la salida se toma a través del resistor y la salida se adelanta a la entrada.
- En un filtro *RL* pasaaltas, la salida se toma a través del inductor y la salida se adelanta a la entrada.
- La pendiente decreciente de un filtro *RC* o *RL* es de –20 dB por década.
- Un filtro pasabanda deja pasar frecuencias localizadas entre las frecuencias críticas baja y alta y rechaza todas las demás.
- Un filtro rechazabanda rechaza frecuencias ubicadas entre sus frecuencias críticas baja y alta y deja pasar todas las demás.
- El factor de calidad (Q) del circuito y la frecuencia resonante determinan el ancho de banda de un filtro resonante.
- Las frecuencias críticas también se llaman frecuencias de –3 dB.
- El voltaje de salida es un 70.7% de su valor máximo en las frecuencias críticas.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas utilizados en el capítulo se definen en el glosario que aparece al final del libro.

Atenuación Reducción de la señal de salida comparada con la señal de entrada, cuyo resultado es una relación con valor menor de 1 del voltaje de salida respecto al voltaje de entrada de un circuito.

Curva de Bode Es la gráfica de la respuesta a la frecuencia de un filtro que muestra el cambio de la relación del voltaje de salida al voltaje de entrada expresada en dB como una función de la frecuencia para un voltaje de entrada constante.

Década Cambio en incrementos de diez de la frecuencia o de otro parámetro.

Filtro pasaaltas Tipo de filtro que dejar pasar todas las frecuencias ubicadas sobre una frecuencia crítica y rechaza todas las frecuencias localizadas bajo dicha frecuencia crítica.

Filtro pasabajas Tipo de filtro que dejar pasar todas las frecuencias ubicadas por debajo de una frecuencia crítica y rechaza todas las frecuencias localizadas sobre dicha frecuencia crítica.

Filtro pasabanda Filtro que deja pasar un intervalo de frecuencias ubicado entre dos frecuencias críticas y rechaza frecuencias localizadas sobre y bajo dicho intervalo.

Filtro rechazabanda Filtro que rechaza un intervalo de frecuencias situado entre dos frecuencias críticas y deja pasar frecuencias localizadas sobre y bajo dicho intervalo.

Frecuencia central (f_0) Frecuencia resonante de un filtro pasabanda o detienebanda.

Frecuencia crítica (f_c) Frecuencia a la cual el voltaje de salida de un filtro es un 70.7% del voltaje máximo.

Pasabanda Intervalo de frecuencias que deja pasar un filtro.

Pendiente decreciente (Roll-off) Es la tasa de disminución de la respuesta a la frecuencia de un filtro.

FÓRMULAS

18–1 $\text{dB} = 10\log\left(\dfrac{P_{sal}}{P_{ent}}\right)$	Relación de potencia en decibeles
18–2 $\text{dB} = 20\log\left(\dfrac{V_{sal}}{V_{ent}}\right)$	Relación de voltaje en decibeles
18–3 $f_c = \dfrac{1}{2\pi RC}$	Frecuencia crítica
18–4 $f_c = \dfrac{1}{2\pi(L/R)}$	Frecuencia crítica
18–5 $AB = \dfrac{f_0}{Q}$	Ancho de banda

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. El voltaje de salida máximo de cierto filtro pasabajas es de 10 V. El voltaje de salida en la frecuencia crítica es de

(a) 10 V **(b)** 0 V **(c)** 7.07 V **(d)** 1.414 V

2. Se aplica un voltaje sinusoidal con valor pico a pico de 15 V a un filtro *RC* pasabajas. Si la reactancia a la frecuencia de entrada es de cero, el voltaje de salida es de
   (a) 15 V de pico a pico **(b)** cero
   (c) 10.6 V de pico a pico **(d)** 7.5 V de pico a pico
3. Se aplica la misma señal de la pregunta 2 a un filtro *RC* pasaaltas. Si la reactancia es de cero en la frecuencia de entrada, el voltaje de salida es de
   (a) 15 V de pico a pico **(b)** cero
   (c) 10.6 V de pico a pico **(d)** 7.5 V de pico a pico
4. En la frecuencia crítica, la salida de un filtro se reduce por debajo de su valor máximo en
   (a) 0 dB **(b)** −3 dB **(c)** −20 dB **(d)** −6 dB
5. Si la salida de un filtro *RC* pasabajas ocurre a 12 dB por debajo de su valor máximo en $f = 1$ kHz, entonces en $f = 10$ kHz, la salida ocurre por debajo de su valor máximo en
   (a) 3 dB **(b)** 10 dB **(c)** 20 dB **(d)** 32 dB
6. En un filtro pasivo, la relación V_{sal}/V_{ent} se llama
   (a) Pendiente decreciente **(b)** ganancia
   (c) atenuación **(d)** reducción crítica
7. Por cada década de incremento de la frecuencia sobre la frecuencia crítica, la salida de un filtro pasabajas disminuye en
   (a) 20 dB **(b)** 3 dB **(c)** 10 dB **(d)** 0 dB
8. En la frecuencia crítica, el desplazamiento de fase a través de un filtro pasaaltas es de
   (a) 90° **(b)** 0° **(c)** 45° **(d)** depende de la reactancia
9. En un filtro pasabanda resonante dispuesto en serie, un valor alto de Q produce
   (a) una frecuencia resonante más alta **(b)** un ancho de banda más pequeño
   (c) una impedancia más alta **(d)** un ancho de banda más grande
10. En condición de resonancia en serie,
   (a) $X_C = X_L$ **(b)** $X_C > X_L$ **(c)** $X_C < X_L$
11. En cierto filtro pasabanda resonante dispuesto en paralelo, la frecuencia resonante es de 10 kHz. Si el ancho de banda es de 2 kHz, la frecuencia crítica baja es
   (a) 5 kHz **(b)** 12 kHz **(c)** 9 kHz **(d)** no determinable
12. En un filtro pasabanda, el voltaje de salida a la frecuencia resonante es
   (a) mínimo **(b)** máximo
   (c) un 70.7% del voltaje máximo **(d)** un 70.7% del voltaje mínimo
13. En un filtro rechazabanda, el voltaje de salida a las frecuencias críticas es
   (a) mínimo **(b)** máximo
   (c) un 70.7% del voltaje máximo **(d)** un 70.7% del voltaje mínimo
14. Con un valor suficientemente alto de Q, la frecuencia resonante de un filtro resonante en paralelo es idealmente
   (a) mucho más grande que la frecuencia resonante de un filtro resonante en serie
   (b) mucho menor que la frecuencia resonante de un filtro resonante en serie
   (c) igual que la frecuencia resonante de un filtro resonante en serie

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 18-38(a).

1. Si la frecuencia del voltaje de entrada se incrementa, V_{sal}
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
2. Si C se incrementa, el voltaje de salida
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 18-38(d).

3. Si la frecuencia del voltaje se incrementa, V_{sal}

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

4. Si L se incrementa, el voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 18-40.

5. Si el interruptor pasa de la posición 1 a la posición 2, la frecuencia crítica

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

6. Si el interruptor pasa de la posición 2 a la posición 3, la frecuencia crítica

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 18-41(a).

7. Si la frecuencia del voltaje de entrada se incrementa, V_{sal}

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

8. Si R se incrementa a 180 Ω, el voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 18-42.

9. Si el interruptor pasa de la posición 1 a la posición 2, la frecuencia crítica

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

10. Si el interruptor está en la posición 3 y R_5 se abre, V_{sal}

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 18-48.

11. Si L_2 se abre, el voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

12. Si C se pone en cortocircuito, el voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 18–1 Filtros pasabajas

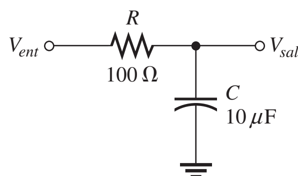
1. En cierto filtro pasabajas, $X_C = 500\ \Omega$ y $R = 2.2\ \text{k}\Omega$. ¿Cuál es el voltaje de salida ($\mathbf{V}_{sal}$) cuando la entrada es de 10 V rms?

2. Un filtro pasabajas tiene frecuencia crítica de 3 kHz. Determine a cuáles de las siguientes frecuencias se les permite pasar y cuáles son rechazadas:

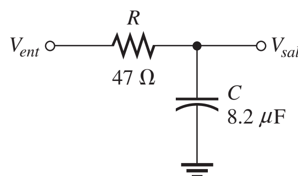
(a) 100 Hz **(b)** 1 kHz **(c)** 2 kHz **(d)** 3 kHz **(e)** 5 kHz

3. Determine el voltaje de salida ($\mathbf{V}_{sal}$) de cada filtro mostrado en la figura 18-38 a la frecuencia especificada cuando $V_{ent} = 10$ V.

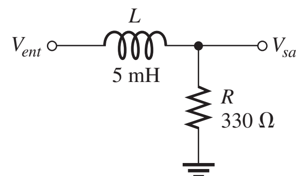
4. ¿Cuál es f_c para cada filtro mostrado en la figura 18-38? Determine el voltaje de salida a f_c en cada caso cuando $V_{ent} = 5$ V.



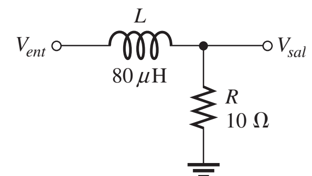
(a) f = 60 Hz



(b) f = 400 Hz



(c) f = 1 kHz



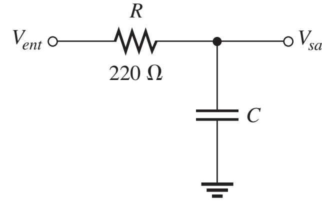
(d) f = 2 kHz

▲ FIGURA 18–38

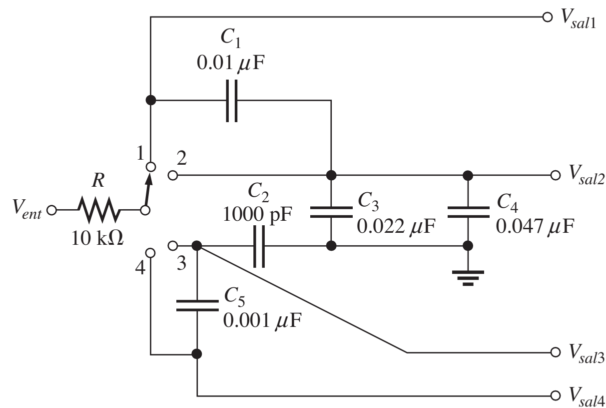
5. Para el filtro de la figura 18-39, calcule el valor de C requerido para cada una de las siguientes frecuencias críticas:

(a) 60 Hz **(b)** 500 Hz **(c)** 1 kHz **(d)** 5 kHz

▶ **FIGURA 18–39**



*__6.__ Determine la frecuencia crítica en cada una de las posiciones del interruptor en la red de filtros conmutados de la figura 18-40.



▲ **FIGURA 18–40**

7. Trace una curva de Bode para cada una de las partes del problema 5.

8. En cada uno de los casos siguientes, exprese la relación de voltaje en dB:

(a) $V_{ent} = 1$ V, $V_{sal} = 1$ V **(b)** $V_{ent} = 5$ V, $V_{sal} = 3$ V

(c) $V_{ent} = 10$ V, $V_{sal} = 7.07$ V **(d)** $V_{ent} = 25$ V, $V_{sal} = 5$ V

9. El voltaje de entrada a un filtro *RC* pasabajas es de 8 V rms. Determine el voltaje de salida a los siguientes niveles de dB:

(a) -1 dB **(b)** -3 dB **(c)** -6 dB **(d)** -20 dB

10. Para cada filtro *RC* pasabajas, determine el voltaje de salida en dB con respecto a una entrada de 0 dB en las siguientes frecuencias ($f_c = 1$ kHz):

(a) 10 kHz **(b)** 100 kHz **(c)** 1 MHz

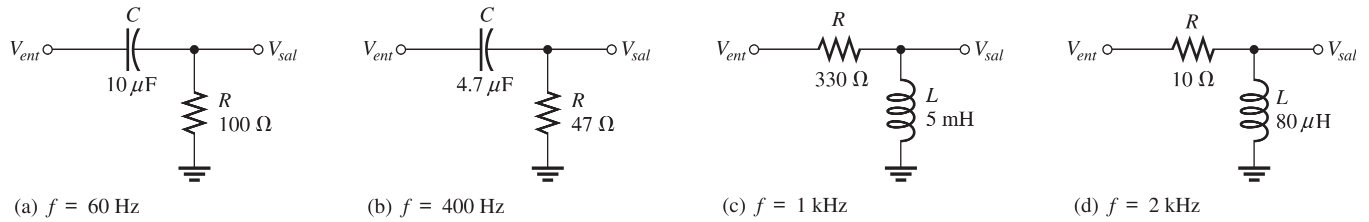
SECCIÓN 18–2 Filtros pasaaltas

11. En un filtro pasaaltas, $X_C = 500\ \Omega$ y $R = 2.2$ kΩ. ¿Cuál es el voltaje de salida ($\mathbf{V}_{sal}$) cuando $V_{ent} =$ 10 V rms?

12. La frecuencia crítica de un filtro pasaaltas es de 50 Hz. Determine a cuáles de las siguientes frecuencias se les permite pasar y cuáles son rechazadas:

(a) 1 Hz **(b)** 20 Hz **(c)** 50 Hz **(d)** 60 Hz **(e)** 30 kHz

13. Determine el voltaje de salida de cada filtro mostrado en la figura 18-41 a la frecuencia especificada cuando $V_{ent} = 10$ V.

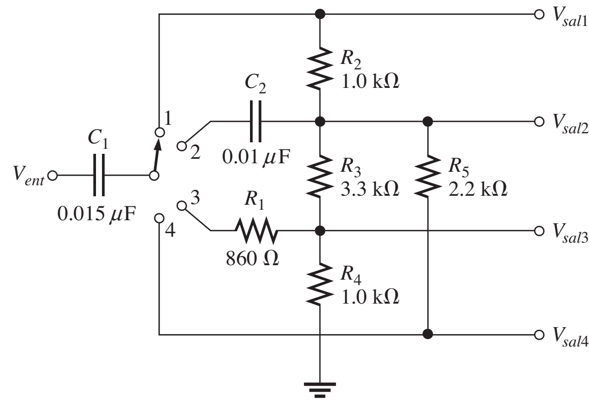


▲ **FIGURA 18–41**

14. ¿Cuál es f_c para cada filtro de la figura 18-41? Determine el voltaje de salida a f_c en cada caso (V_{ent} = 10 V).

15. Trace la curva de Bode para cada filtro mostrado en la figura 18-41.

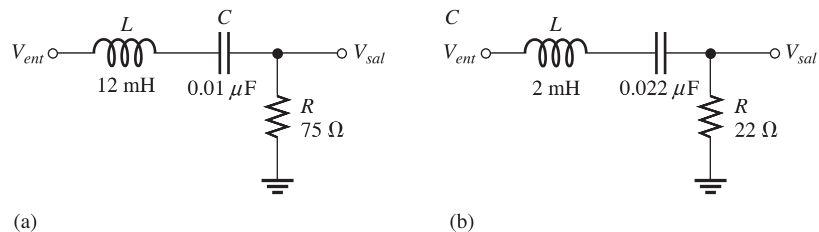
***16.** Determine f_c para cada una de las posiciones del interruptor en la figura 18-42.



▲ **FIGURA 18–42**

SECCIÓN 18–3 Filtros pasabanda

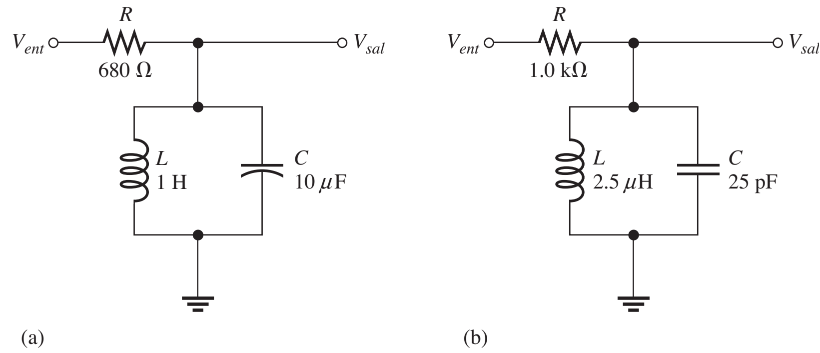
17. Determine la frecuencia central para cada filtro de la figura 18-43.



▲ **FIGURA 18–43**

18. Suponiendo que la resistencia de devanado de las bobinas mostradas en la figura 18-43 es de 10 Ω, determine el ancho de banda para cada filtro.

19. ¿Cuáles son las frecuencias críticas alta y baja para cada filtro de la figura 18-43? Suponga que la respuesta es simétrica con respecto a f_0.



▲ **FIGURA 18–44**

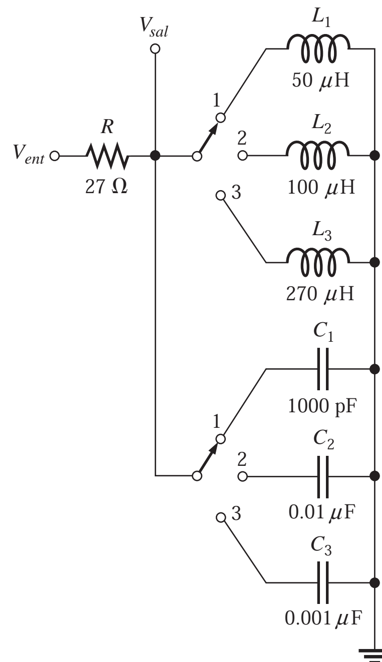
20. Para cada filtro mostrado en la figura 18-44, determine la frecuencia central de la pasabanda. Ignore R_W.

21. Si la resistencia de devanado de las bobinas que aparecen en la figura 18-44 es de 4 Ω, ¿cuál es el voltaje de salida en condición de resonancia cuando $V_{ent} = 120$ V?

*__22.__ Determine la separación de las frecuencias centrales en todas las posiciones del interruptor de la figura 18-45. ¿Se traslapan algunas de las respuestas? Suponga que $R_W = 0\ \Omega$ para cada bobina.

*__23.__ Diseñe un filtro pasabanda utilizando un circuito resonante paralelo que satisfaga las siguientes especificaciones: $AB = 500$ Hz; $Q = 40$; e $I_{C(máx)} = 20$ mA, $V_{C(máx)} = 2.5$ V.

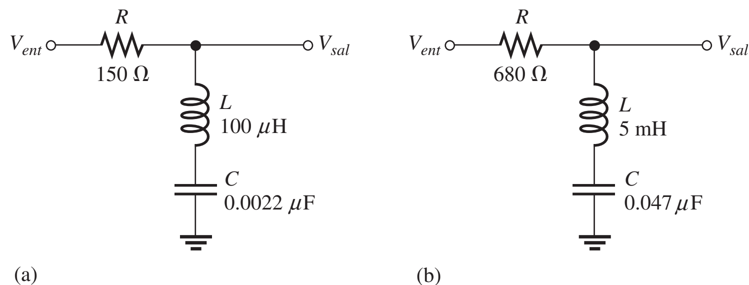
▶ **FIGURA 18–45**



SECCIÓN 18–4 Filtros Rechazabanda

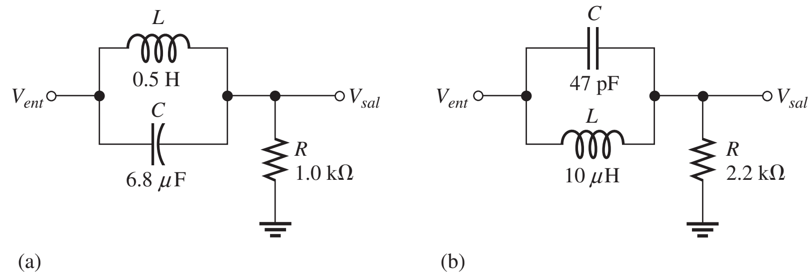
24. Determine la frecuencia central para cada filtro mostrado en la figura 18-46.

▶ **FIGURA 18–46**



25. Para cada filtro de la figura 18-47, determine la frecuencia central de la banda de rechazo.

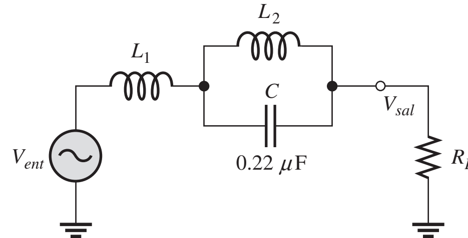
26. Si la resistencia de las bobinas de la figura 18-47 es de 8 Ω, ¿cuál es el voltaje de salida en condición de resonancia cuando $V_{ent} = 50$ V?



▲ **FIGURA 18–47**

***27.** Determine los valores de L_1 y L_2 en la figura 18-48 para dejar pasar una señal con frecuencia de 1200 kHz y rechazar una señal con frecuencia de 456 kHz.

▶ **FIGURA 18–48**





Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren el uso del CD-ROM Multisim.

28. Abra el archivo P18-28 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

29. Abra el archivo P18-29 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

30. Abra el archivo P18-30 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

31. Abra el archivo P18-31 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

32. Abra el archivo P18-32 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

33. Abra el archivo P18-33 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

34. Abra el archivo P18-34 y determine la frecuencia central del circuito.

35. Abra el archivo P18-35 y determine el ancho de banda del circuito.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 18–1 Filtros pasabajas

1. La banda de paso es de 0 Hz a 2.5 kHz.

2. $\mathbf{V}_{sal} = 100\angle -88.9°$ mV rms

3. $20 \log(V_{sal}/V_{ent}) = -9.54$ dB

SECCIÓN 18–2 Filtros pasaaltas

1. $V_{sal} = 0.707$ V

2. $\mathbf{V}_{sal} = 9.98\angle 3.81°$ V

SECCIÓN 18–3 Filtros pasabanda

1. $AB = 30.2\text{ kHz} - 29.8\text{ kHz} = 400\text{ Hz}$
2. $f_0 \cong 1.04\text{ MHz}$

SECCIÓN 18–4 Filtros rechazabanda

1. Un filtro rechazabanda rechaza, en lugar de dejar pasar, una banda de frecuencias.
2. Una combinación de filtros pasaaltas/pasabajas, un circuito resonante en serie, y un circuito resonante en paralelo.

Una aplicación de circuito

1. Las formas de onda indican que la amplitud de salida disminuye al incrementarse la frecuencia, como en un filtro pasabajas.
2. Las formas de onda indican que la amplitud de salida es máxima a 10 kHz y se reduce por encima y por debajo de este valor, como en un filtro pasabanda.

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

18–1 -1.41 dB

18–2 7.23 kHz

18–3 f_c se incrementa a 159 kHz. La pendiente decreciente se mantiene a -20 dB/década.

18–4 f_c se incrementa a 350 kHz. La pendiente decreciente se mantiene a -20 dB/década.

18–5 -60 dB

18–6 $C = 0.723\ \mu\text{F}$; $V_{sal} = 4.98\text{ V}$; $\phi = 5.7°$

18–7 10.5 kHz

18–8 El ancho de banda se incrementa a 18.8 kHz.

18–9 1.59 MHz

18–10 7.12 kHz (ninguna diferencia significativa).

18–11 $V_{sal} = 15.2\text{ mV}$; $AB = 105\text{ Hz}$

18–12 1.94 V

AUTOEVALUACIÓN

1. (c) **2.** (b) **3.** (a) **4.** (b) **5.** (d) **6.** (c) **7.** (a) **8.** (c)
9. (b) **10.** (a) **11.** (c) **12.** (b) **13.** (c) **14.** (c)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (b) **2.** (b) **3.** (b) **4.** (b) **5.** (b) **6.** (a) **7.** (a) **8.** (a)
9. (a) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (a)

Teoremas de circuitos en análisis de ca

19

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Aplicar el teorema de superposición al análisis de circuitos de ca
- Aplicar el teorema de Thevenin para simplificar circuitos reactivos de ca para su análisis
- Aplicar el teorema de Norton para simplificar circuitos reactivos de ca
- Aplicar el teorema de transferencia de potencia máxima

TÉRMINOS CLAVE

- Circuito equivalente
- Conjugado complejo
- Teorema de Norton
- Teorema de superposición
- Teorema de Thevenin

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, se evaluará un módulo filtro pasabanda para determinar los valores de sus componentes internos. Se aplicará el teorema de Thevenin para determinar la impedancia de carga óptima para transferir potencia máxima.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 8 se abordaron cuatro teoremas importantes con énfasis en sus aplicaciones en el análisis de circuitos de cd. Este capítulo es una continuación de esa cobertura con énfasis en aplicaciones en el análisis de circuitos de ca que incluyen componentes reactivos.

Los teoremas abordados en este capítulo facilitan el análisis de ciertos tipos de circuitos. Estos métodos no reemplazan a la ley de Ohm ni a las leyes de Kirchhoff, aunque normalmente se utilizan junto con dichas leyes en ciertas situaciones.

El teorema de superposición ayuda a abordar circuitos que tienen fuentes múltiples. Los teoremas de Thevenin y de Norton proporcionan métodos para reducir un circuito a una forma equivalente simple y facilitar su análisis. El teorema de transferencia de potencia máxima se utiliza en aplicaciones donde es importante que un circuito dado suministre potencia máxima a una carga.

19–1 EL TEOREMA DE SUPERPOSICIÓN

El teorema de superposición se introdujo en el capítulo 8 para utilizarse en el análisis de circuitos de cd. En esta sección, el teorema de superposición se aplica a circuitos que tienen fuentes de ca y componentes reactivos.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema de superposición al análisis de circuitos de ca**
  - Expresar el teorema de superposición
  - Enumerar los pasos necesarios para aplicar el teorema

El **teorema de superposición** se expresa como sigue:

En un circuito con fuentes múltiples, la corriente en cualquier rama dada puede calcularse al determinar las corrientes producidas en esa rama en particular por cada fuente, con todas las demás fuentes siendo reemplazadas por sus impedancias internas. La corriente total en la rama dada es la suma fasorial de las corrientes individuales que haya en dicha rama.

El procedimiento para aplicar el teorema de superposición es el siguiente:

Paso 1. Dejar una de las fuentes de voltaje (corriente) en el circuito y reemplazar todas las demás con su impedancia interna. En fuentes de voltaje ideales, la impedancia interna es de cero. En fuentes de corriente ideales, la impedancia interna es infinita. A este procedimiento se le llamará *poner en cero* la fuente.

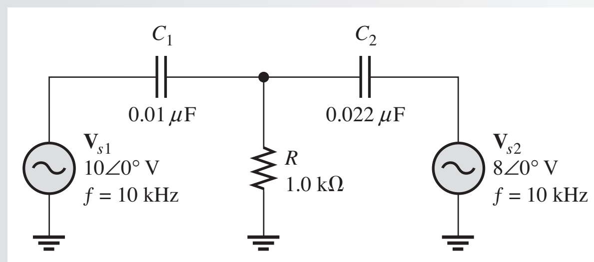
Paso 2. Determinar la corriente en la rama de interés producida por la fuente restante.

Paso 3. Repetir los pasos 1 y 2 para cada fuente en turno. Al terminar, se tendrán varios valores de corriente en número igual al de fuentes que haya en el circuito.

Paso 4. Sumar los valores de corriente individuales como cantidades fasoriales.

El ejemplo 19-1 ilustra este procedimiento para un circuito que contiene dos fuentes de voltaje ideales, V_{s1} y V_{s2}.

EJEMPLO 19–1 Determine la corriente en R para la figura 19-1 con el teorema de superposición. Suponga que las impedancias internas de la fuente son de cero.

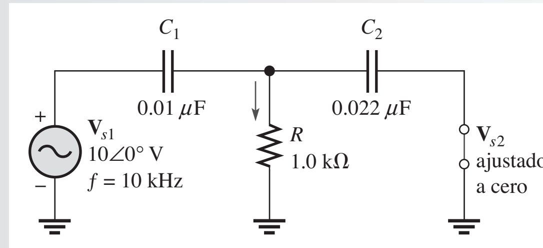


▲ FIGURA 19–1

Solution **Paso 1.** Reemplace V_{s2} con su impedancia interna (cero en este caso), y determine la corriente en R producida por V_{s1}, como se indica en la figura 19-2.

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 1.59\text{ k}\Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(0.022\ \mu\text{F})} = 723\ \Omega$$



▲ **FIGURA 19–2**

Desde el punto de vista de V_{s1}, la impedancia es

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X}_{C1} + \frac{\mathbf{R}\mathbf{X}_{C2}}{\mathbf{R} + \mathbf{X}_{C2}} = 1.59\angle -90^\circ\text{ k}\Omega + \frac{(1.0\angle 0^\circ\text{ k}\Omega)(723\angle -90^\circ\ \Omega)}{1.0\text{ k}\Omega - j723\ \Omega}$$

$$= 1.59\angle -90^\circ\text{ k}\Omega + 588\angle -54.1^\circ\ \Omega$$

$$= -j1.59\text{ k}\Omega + 345\ \Omega - j476\ \Omega = 345\ \Omega - j2.07\text{ k}\Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = 2.10\angle -80.5^\circ\text{ k}\Omega$$

La corriente total producida por V_{s1} es

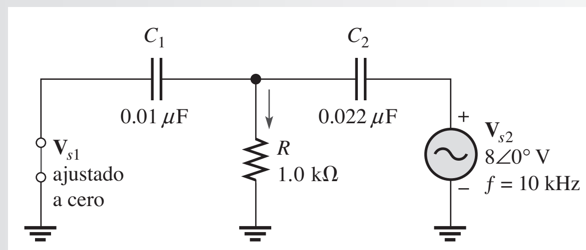
$$\mathbf{I}_{s1} = \frac{\mathbf{V}_{s1}}{\mathbf{Z}} = \frac{10\angle 0^\circ\text{ V}}{2.10\angle -80.5^\circ\text{ k}\Omega} = 4.76\angle 80.5^\circ\text{ mA}$$

Use la fórmula del divisor de corriente. La corriente a través de R producida por V_{s1} es

$$\mathbf{I}_{R1} = \left(\frac{X_{C2}\angle -90^\circ}{R - jX_{C2}}\right)\mathbf{I}_{s1} = \left(\frac{723\angle -90^\circ\ \Omega}{1.0\text{ k}\Omega - j723\ \Omega}\right)4.76\angle 80.5^\circ\text{ mA}$$

$$= (0.588\angle -54.9^\circ\ \Omega)(4.76\angle 80.5^\circ\text{ mA}) = 2.80\angle 25.6^\circ\text{ mA}$$

Paso 2. Determine la corriente en R producida por la fuente V_{s2} reemplazando V_{s1} con su impedancia interna (cero), como se muestra en la figura 19-3.



▲ **FIGURA 19–3**

Desde la perspectiva de V_{s2}, la impedancia es

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X}_{C2} + \frac{\mathbf{R}\mathbf{X}_{C1}}{\mathbf{R} + \mathbf{X}_{C1}} = 723\angle -90^\circ\ \Omega + \frac{(1.0\angle 0^\circ\ \text{k}\Omega)(1.59\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega)}{1.0\ \text{k}\Omega - j1.59\ \text{k}\Omega}$$

$$= 723\angle -90^\circ\ \Omega + 847\angle -32.2^\circ\ \Omega$$

$$= -j723\ \Omega + 717\ \Omega - j451\ \Omega = 717\ \Omega - j1174\ \Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = 1376\angle -58.6^\circ\ \Omega$$

La corriente total producida por V_{s2} es

$$\mathbf{I}_{s2} = \frac{\mathbf{V}_{s2}}{\mathbf{Z}} = \frac{8\angle 0^\circ\ \text{V}}{1376\angle -58.6^\circ\ \Omega} = 5.81\angle 58.6^\circ\ \text{mA}$$

Use la fórmula del divisor de corriente. La corriente a través de R producida por V_{s2} es

$$\mathbf{I}_{R2} = \left(\frac{X_{C1}\angle -90^\circ}{R - jX_{C1}}\right)\mathbf{I}_{s2}$$

$$= \left(\frac{1.59\angle -90^\circ\ \text{k}\Omega}{1.0\ \text{k}\Omega - j1.59\ \text{k}\Omega}\right)5.81\angle 58.6^\circ\ \text{mA} = 4.91\angle 26.4^\circ\ \text{mA}$$

Paso 3. Convierta las dos corrientes que circulan por los resistores a forma rectangular y súmelas para obtener la corriente total a través de R.

$$\mathbf{I}_{R1} = 2.80\angle 25.6^\circ\ \text{mA} = 2.53\ \text{mA} + j1.21\ \text{mA}$$

$$\mathbf{I}_{R2} = 4.91\angle 26.4^\circ\ \text{mA} = 4.40\ \text{mA} + j2.18\ \text{mA}$$

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_{R1} + \mathbf{I}_{R2} = 6.93\ \text{mA} + j3.39\ \text{mA} = \mathbf{7.71\angle 26.1^\circ\ mA}$$

Problema relacionado* Determine $\mathbf{I}_R$ si $\mathbf{V}_{s2} = 8\angle 180^\circ$ V en la figura 19-1.



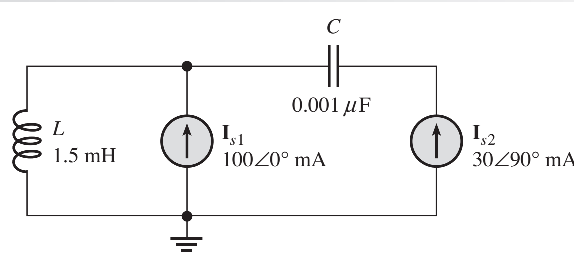
Use el archivo Multisim E19-01 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

El ejemplo 19-2 ilustra la aplicación del teorema de superposición para un circuito con dos fuentes de corriente, I_{s1} e I_{s2}.

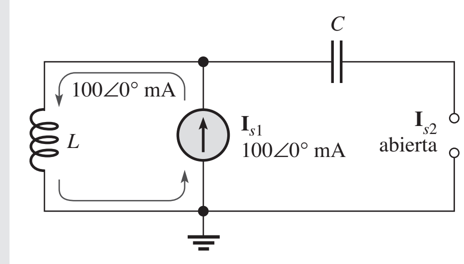
EJEMPLO 19–2 Determine la corriente en el inductor de la figura 19-4. Suponga que las fuentes de corriente son ideales.

▶ **FIGURA 19–4**



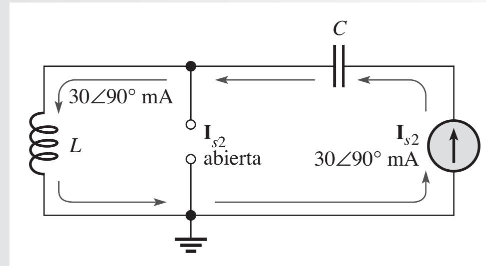
Solución **Paso 1.** Determine la corriente que circula por el inductor producida por la fuente de corriente I_{s1} reemplazando la fuente I_{s2} con una abertura, según muestra la figura 19-5. Como puede advertir, los 100 mA producidos por la fuente de corriente I_{s1} pasan a través del inductor.

▶ **FIGURA 19–5**



Paso 2. Determine la corriente que circula por el inductor producida por la fuente de corriente I_{s2} reemplazando la fuente I_{s1} con una abertura, como se indica en la figura 19-6. Advierta que los 30 mA producidos por la fuente I_{s2} pasan a través del inductor.

▶ **FIGURA 19–6**



Paso 3. Para obtener la corriente total a través del inductor, superponga las dos corrientes individuales y súmelas como cantidades fasoriales:

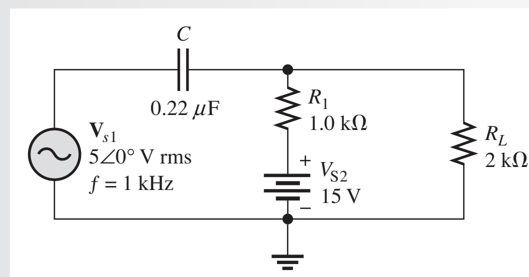
$$\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_{L1} + \mathbf{I}_{L2}$$
$$= 100\angle 0^\circ\ \text{mA} + 30\angle 90^\circ\ \text{mA} = 100\ \text{mA} + j30\ \text{mA}$$
$$= \mathbf{104\angle 16.7^\circ\ mA}$$

Problema relacionado Determine la corriente a través del capacitor en la figura 19-4.

El ejemplo 19-3 ilustra el análisis de un circuito que tiene una fuente de voltaje de ca y una fuente de voltaje de cd. Esta situación es común en muchas aplicaciones de amplificador.

EJEMPLO 19–3 En la figura 19-7, encuentre la corriente total en el resistor de carga, R_L. Suponga que las fuentes son ideales.

▶ **FIGURA 19–7**



Solución **Paso 1.** Determine la corriente a través de R_L producida por la fuente de ca V_{s1} ajustando a cero (reemplazándola con su impedancia interna) la fuente de cd V_{s2}, como se muestra en la figura 19-8. Desde la perspectiva de V_{s1}, la impedancia es

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X}_C + \frac{\mathbf{R}_1\mathbf{R}_L}{\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_L}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi(1.0\text{ kHz})(0.22\ \mu\text{F})} = 723\ \Omega$$

$$\mathbf{Z} = 723\angle -90^\circ\ \Omega + \frac{(1.0\angle 0^\circ\text{ k}\Omega)(2\angle 0^\circ\text{ k}\Omega)}{3\angle 0^\circ\text{ k}\Omega}$$

$$= -j723\ \Omega + 667\ \Omega = 984\angle -47.3^\circ\ \Omega$$

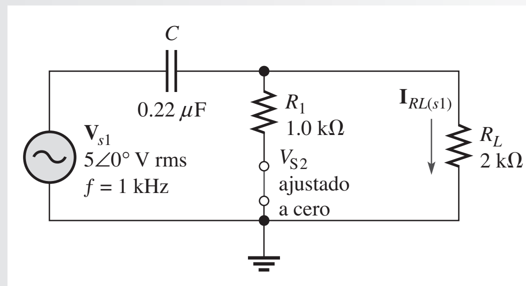
La corriente total producida por la fuente de ca es

$$\mathbf{I}_{s1} = \frac{\mathbf{V}_{s1}}{\mathbf{Z}} = \frac{5\angle 0^\circ\text{ V}}{984\angle -47.3^\circ\ \Omega} = 5.08\angle 47.3^\circ\text{ mA}$$

Use el método del divisor de corriente. La corriente en R_L producida por V_{s1} es

$$\mathbf{I}_{RL(s1)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_L}\right)\mathbf{I}_{s1} = \left(\frac{1.0\text{ k}\Omega}{3\text{ k}\Omega}\right)5.08\angle 47.3^\circ\text{ mA} = 1.69\angle 47.3^\circ\text{ mA}$$

▶ **FIGURA 19–8**



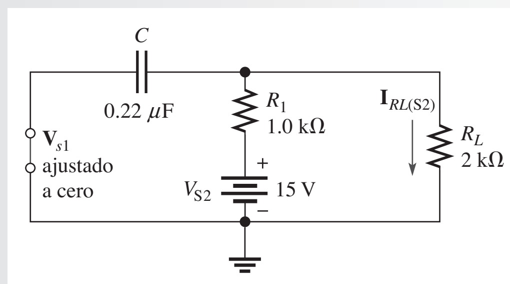
Paso 2. Determine la corriente en R_L producida por la fuente V_{S2} ajustando a cero V_{s1} (reemplazándola con su impedancia interna), como se muestra en la figura 19-9. La magnitud de la impedancia vista por V_{S2} es

$$Z = R_1 + R_L = 3\text{ k}\Omega$$

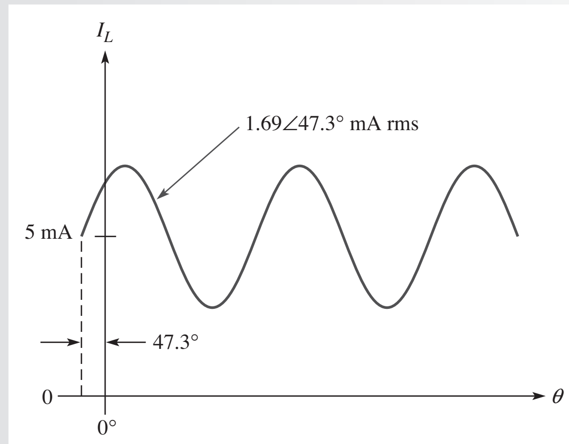
La corriente producida por V_{S2} es

$$I_{RL(S2)} = \frac{V_{S2}}{Z} = \frac{15\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 5\text{ mA dc}$$

▶ **FIGURA 19–9**



Paso 3. Por superposición, la corriente total en R_L es de 1.69 ∠ 47.3° mA montada sobre un nivel de cd de 5 mA, como se indica en la figura 19-10.



▲ FIGURA 19–10

Problema relacionado Determine la corriente a través de R_L si V_{S2} se cambia a 9 V.

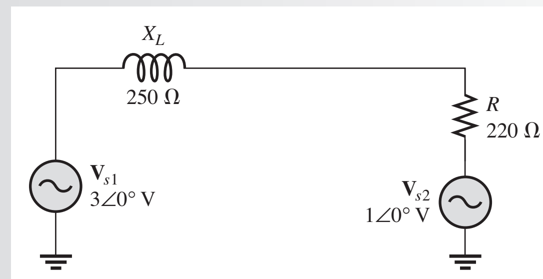


Use el archivo Multisim E19-03 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 19-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Si dos corrientes iguales fluyen en direcciones opuestas en cualquier instante en una rama dada de un circuito, ¿cuál es la corriente neta en dicho instante?
2. ¿Por qué es útil el teorema de superposición en el análisis de circuitos con fuentes múltiples?
3. Utilice el teorema de superposición para determinar la magnitud de la corriente a través de R en la figura 19-11.

▶ FIGURA 19–11



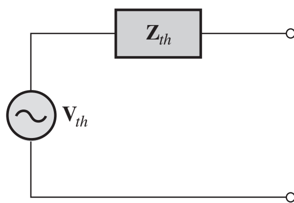
19–2 TEOREMA DE THEVENIN

El **teorema de Thevenin**, tal como se aplica a circuitos de ca, proporciona un método para reducir cualquier circuito a una forma equivalente compuesta por una fuente de voltaje de ca equivalente en serie con una impedancia equivalente.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema de Thevenin para simplificar circuitos de ca reactivos para su análisis**
    - Describir la forma de un circuito equivalente de Thevenin
    - Obtener la fuente de voltaje de ca equivalente de Thevenin
    - Obtener la impedancia equivalente de Thevenin
    - Enumerar los pasos al aplicar el teorema de Thevenin a un circuito de ca

Equivalencia

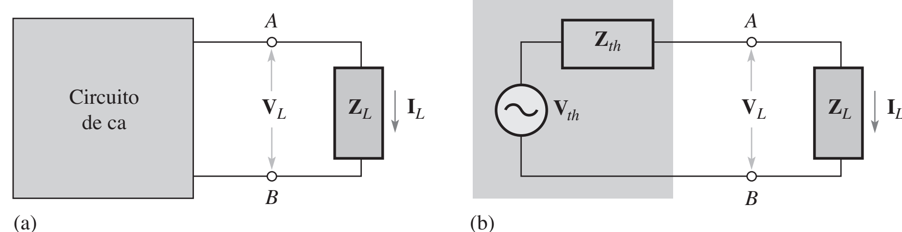


▲ FIGURA 19–12

Circuito equivalente de Thevenin.

La forma de **circuito equivalente** de Thevenin se muestra en la figura 19-12. Sin importar cuán complejo sea el circuito original, siempre es posible reducirlo a esta forma equivalente. La fuente de voltaje equivalente se designa mediante $\mathbf{V}_{th}$; la impedancia equivalente se designa con $\mathbf{Z}_{th}$ (el subíndice en minúsculas cursivas denota la cantidad de ca). Advierta que la impedancia está representada por un bloque en el diagrama de circuito. Esto es porque la impedancia equivalente puede ser de varias formas: puramente resistiva, puramente capacitiva, puramente inductiva, o una combinación de una resistencia y una reactancia.

La figura 19-13(a) muestra un diagrama de bloques que representa un circuito de ca de cualquier complejidad dada. Este circuito dispone de dos terminales de salida, *A* y *B*. Se conecta una impedancia de carga, $\mathbf{Z}_L$, a las terminales. El circuito produce cierto voltaje, $\mathbf{V}_L$, y cierta corriente, $\mathbf{I}_L$, tal como se ilustra.



▲ FIGURA 19–13

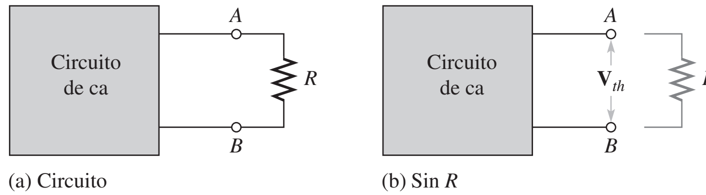
Un circuito de ca de cualquier complejidad puede ser reducido a un equivalente de Thevenin para cumplir propósitos de análisis.

De acuerdo con el teorema de Thevenin, el circuito mostrado en el bloque puede ser reducido a una forma equivalente, como se indica en el área más clara de la figura 19-13(b). El término *equivalente* significa que, cuando se conecta el mismo valor de carga tanto al circuito original como al circuito equivalente de Thevenin, los voltajes y las corrientes presentes en la carga son iguales en ambos circuitos. Por consiguiente, en cuanto a la carga, no hay diferencia entre el circuito original y el circuito equivalente de Thevenin. La carga "ve" la misma corriente y el mismo voltaje sin importar si está conectada al circuito original o al equivalente de Thevenin. En el caso de circuitos de ca, el circuito equivalente es para una frecuencia en particular. Cuando cambia la frecuencia, habrá que calcular de nuevo el circuito equivalente.

Voltaje equivalente de Thevenin ($\mathbf{V}_{th}$)

Como se ha visto, el voltaje equivalente, $\mathbf{V}_{th}$, es una parte del circuito equivalente de Thevenin completo.

El voltaje equivalente de Thevenin se define como el voltaje de circuito abierto entre dos terminales especificadas en un circuito.



▲ FIGURA 19–14

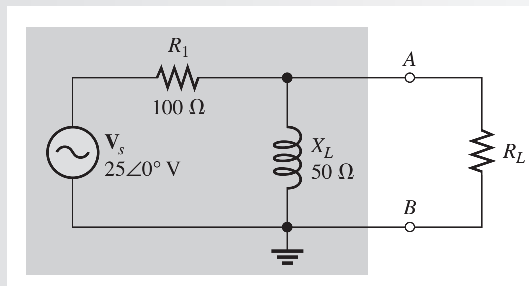
Cómo se determina $\mathbf{V}_{th}$.

A manera de ilustración, supongamos que un circuito de ca de algún tipo tiene un resistor conectado entre dos terminales específicas, *A* y *B*, como se muestra en la figura 19-14(a). Se desea determinar el circuito equivalente de Thevenin para el circuito "visto" por *R*. $\mathbf{V}_{th}$ es el voltaje entre las terminales *A* y *B*, al remover *R*, como indica la parte (b) de la figura. El circuito es visto desde las terminales abiertas *A* y *B*, y *R* se considera externo al circuito para el que se va a encontrar el equivalente de Thevenin.

Los tres ejemplos siguientes muestran cómo determinar $\mathbf{V}_{th}$.

EJEMPLO 19–4

Consulte la figura 19-15. Determine $\mathbf{V}_{th}$ para el circuito ubicado dentro del cuadro sombreado visto desde las terminales *A* y *B*.



▲ FIGURA 19–15

Solución Retire R_L y determine el voltaje de *A* a *B* ($\mathbf{V}_{th}$). En este caso, el voltaje de *A* a *B* es el mismo que el voltaje entre los extremos de X_L. Éste se determina utilizando el método del divisor de voltaje.

$$\mathbf{V}_L = \left(\frac{X_L\angle 90^\circ}{R_1 + jX_L}\right)\mathbf{V}_s$$

$$= \left(\frac{50\angle 90^\circ\ \Omega}{100\ \Omega + j50\ \Omega}\right)$$

$$= \left(\frac{50\angle 90^\circ\ \Omega}{112\angle 26.6^\circ\ \Omega}\right)25\angle 0^\circ\ \text{V} = 11.2\angle 63.4^\circ\ \text{V}$$

$$\mathbf{V}_{th} = \mathbf{V}_{AB} = \mathbf{V}_L = \mathbf{11.2\angle 63.4^\circ\ V}$$

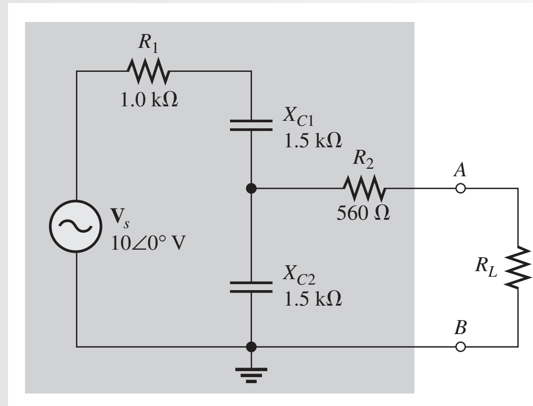
Problema relacionado Determine $\mathbf{V}_{th}$ si R_1 se cambia a 47 Ω en la figura 19-15.



Use el archivo Multisim E19-04 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 19–5 Consulte la figura 19-16. Determine el voltaje de Thevenin para el circuito ubicado dentro del cuadro sombreado visto desde las terminales A y B.

▶ **FIGURA 19–16**



Solución Para este circuito, el voltaje de Thevenin entre las terminales A y B es el voltaje que aparece entre A y B con R_L retirado del circuito.

No hay caída de voltaje entre los extremos de R_2 porque la abertura entre las terminales A y B impiden que circule corriente a través de él. Por tanto, $\mathbf{V}_{AB}$ es el mismo que $\mathbf{V}_{C2}$ y se calcula con la fórmula del divisor de voltaje.

$$\mathbf{V}_{AB} = \mathbf{V}_{C2} = \left(\frac{X_{C2}\angle -90°}{R_1 - jX_{C1} - jX_{C2}}\right)\mathbf{V}_s = \left(\frac{1.5\angle -90°\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega - j3\text{ k}\Omega}\right)10\angle 0°\text{ V}$$

$$= \left(\frac{1.5\angle -90°\text{ k}\Omega}{3.16\angle -71.6°\text{ k}\Omega}\right)10\angle 0°\text{ V} = 4.75\angle -18.4°\text{ V}$$

$$\mathbf{V}_{th} = \mathbf{V}_{AB} = \mathbf{4.75\angle -18.4°\ V}$$

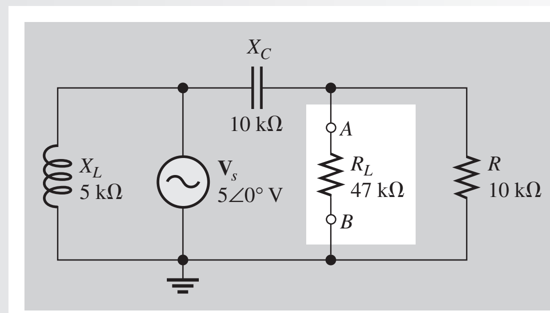
Problema relacionado Determine $\mathbf{V}_{th}$ si R_1 se cambia a 2.2 kΩ en la figura 19-16.



Use el archivo Multisim E19-05 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

EJEMPLO 19–6 Consulte la figura 19-17. Determine $\mathbf{V}_{th}$ para el circuito ubicado dentro del cuadro sombreado visto desde las terminales A y B.

▶ **FIGURA 19–17**



Solución Primero retire R_L y determine el voltaje entre las terminales abiertas resultantes, el cual es $\mathbf{V}_{th}$. Determine $\mathbf{V}_{th}$ aplicando la fórmula del divisor de voltaje a X_C y R.

$$\mathbf{V}_{th} = \mathbf{V}_R = \left(\frac{R\angle 0°}{R - jX_C}\right)\mathbf{V}_s = \left(\frac{10\angle 0° \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega - j10 \text{ k}\Omega}\right)5\angle 0° \text{ V}$$
$$= \left(\frac{10\angle 0° \text{ k}\Omega}{14.1\angle -45° \text{ k}\Omega}\right)5\angle 0° \text{ V} = \mathbf{3.55\angle 45° \text{ V}}$$

Advierta que X_L no afecta el resultado, puesto que la fuente de 5 V aparece a través de la combinación de X_C y R.

Problema relacionado Determine $\mathbf{V}_{th}$ si R es de 22 kΩ y R_L de 39 kΩ en la figura 19-17.



Use el archivo Multisim E19-06 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

Impedancia equivalente de Thevenin ($\mathbf{Z}_{th}$)

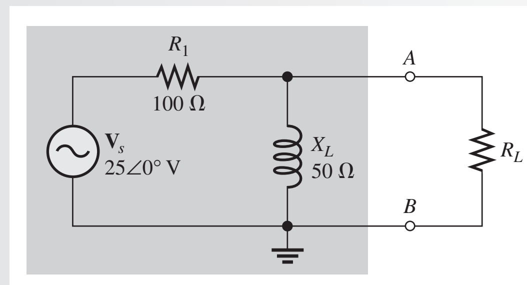
Los ejemplos previos ilustraron cómo determinar $\mathbf{V}_{th}$. Ahora, se determinará la impedancia equivalente de Thevenin, $\mathbf{Z}_{th}$, que es la segunda parte de un circuito equivalente de Thevenin. Como la define el teorema de Thevenin,

> **la impedancia equivalente de Thevenin es la impedancia total que aparece entre dos terminales especificadas en un circuito dado con todas las fuentes siendo reemplazadas por sus impedancias internas.**

Para determinar $\mathbf{Z}_{th}$ entre dos terminales cualesquiera en un circuito, se reemplazan todas las fuentes de voltaje por un corto (cualquier impedancia interna permanece en serie). Reemplace todas las fuentes de corriente por una abertura (cualquier impedancia interna permanece en paralelo). Calcule en seguida la impedancia total entre las dos terminales. Los tres ejemplos siguientes ilustran cómo calcular $\mathbf{Z}_{th}$.

EJEMPLO 19–7 Determine $\mathbf{Z}_{th}$ para la parte del circuito de la figura 19-18 que está dentro del cuadro sombreado y es vista desde las terminales A y B. Este es el mismo circuito utilizado en el ejemplo 19-4.

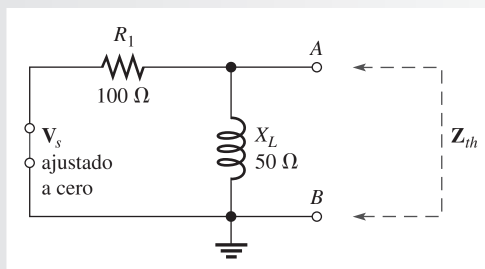
▶ FIGURA 19–18



Solución Primero, reemplace $\mathbf{V}_s$ con su impedancia interna (cero en este caso), según muestra la figura 19-19. Al examinar entre las terminales A y B, se advierte que R_1 y X_L están en paralelo. Por tanto,

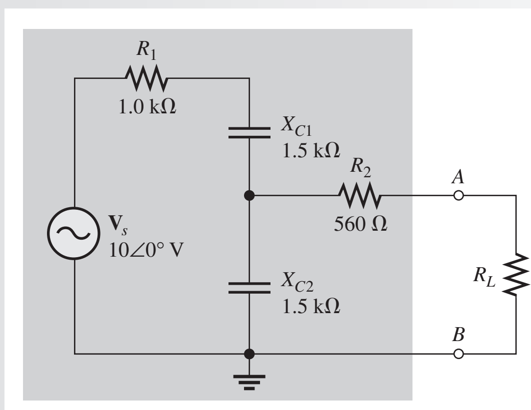
$$\mathbf{Z}_{th} = \frac{(R_1\angle 0°)(X_L\angle 90°)}{R_1 + jX_L} = \frac{(100\angle 0° \ \Omega)(50\angle 90° \ \Omega)}{100 \ \Omega + j50 \ \Omega}$$
$$= \frac{(100\angle 0° \ \Omega)(50\angle 90° \ \Omega)}{112\angle 26.6° \ \Omega} = \mathbf{44.6\angle 63.4° \ \Omega}$$

▶ FIGURA 19–19



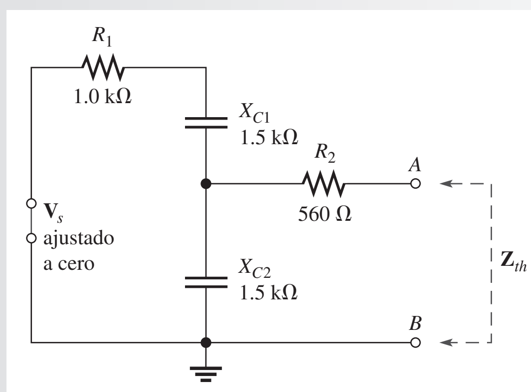
Problema relacionado Cambie R_1 a 47 Ω y determine $\mathbf{Z}_{th}$.

EJEMPLO 19–8 Consulte la figura 19-20. Determine $\mathbf{Z}_{th}$ para el circuito ubicado dentro del cuadro sombreado y es visto desde las terminales *A* y *B*. Este es el mismo circuito utilizado en el ejemplo 19-5.



▲ FIGURA 19–20

Solución Primero, reemplace la fuente de voltaje con su impedancia interna (cero en este caso), como se muestra en la figura 19-21.



▲ FIGURA 19–21

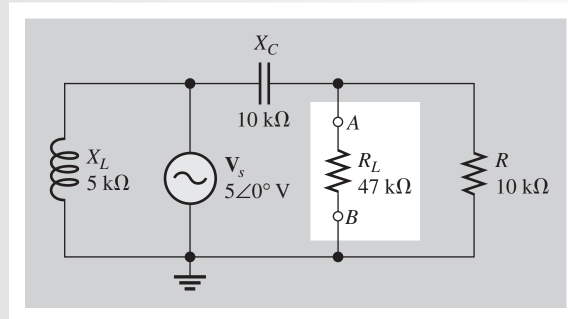
Desde la perspectiva de las terminales A y B, C_2 aparece en paralelo con la combinación en serie de R_1 y C_1. Toda esta combinación está en serie con R_2. El cálculo para determinar $\mathbf{Z}_{th}$ es como sigue:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_{th} &= R_2\angle 0° + \frac{(X_{C2}\angle -90°)(R_1 - jX_{C1})}{R_1 - jX_{C1} - jX_{C2}} \\
&= 560\angle 0°\ \Omega + \frac{(1.5\angle -90°\ \text{k}\Omega)(1.0\ \text{k}\Omega - j1.5\ \text{k}\Omega)}{1.0\ \text{k}\Omega - j3\ \text{k}\Omega} \\
&= 560\angle 0°\ \Omega + \frac{(1.5\angle -90°\ \text{k}\Omega)(1.8\angle -56.3°\ \text{k}\Omega)}{3.16\angle -71.6°\ \text{k}\Omega} \\
&= 560\angle 0°\ \Omega + 854\angle -74.7°\ \Omega = 560\ \Omega + 225\ \Omega - j824\ \Omega \\
&= 785\ \Omega - j824\ \Omega = \mathbf{1138\angle -46.4°\ \Omega}
\end{aligned}$$

Problema relacionado Determine $\mathbf{Z}_{th}$ si R_1 se cambia a 2.2 kΩ en la figura 19-20.

EJEMPLO 19–9 Consulte la figura 19-22. Determine $\mathbf{Z}_{th}$ para la parte del circuito ubicada dentro del cuadro sombreado y es vista desde las terminales A y B. Este es el mismo circuito del ejemplo 19-6.

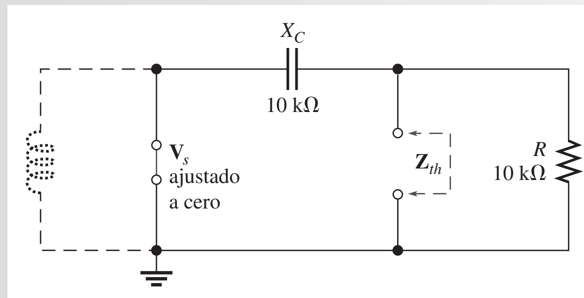
▶ FIGURA 19–22



Solución Con la fuente de voltaje reemplazada por su impedancia interna (cero en este caso), X_L queda efectivamente fuera del circuito. R y C aparecen en paralelo vistas desde las terminales abiertas, como se indica en la figura 19-23. $\mathbf{Z}_{th}$ se calcula como sigue:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_{th} &= \frac{(R\angle 0°)(X_C\angle -90°)}{R - jX_C} = \frac{(10\angle 0°\ \text{k}\Omega)(10\angle -90°\ \text{k}\Omega)}{10\ \Omega - j10\ \text{k}\Omega} \\
&= \frac{(10\angle 0°\ \text{k}\Omega)(10\angle -90°\ \text{k}\Omega)}{14.1\angle -45°\ \text{k}\Omega} = \mathbf{7.07\angle -45°\ \text{k}\Omega}
\end{aligned}$$

▶ FIGURA 19–23

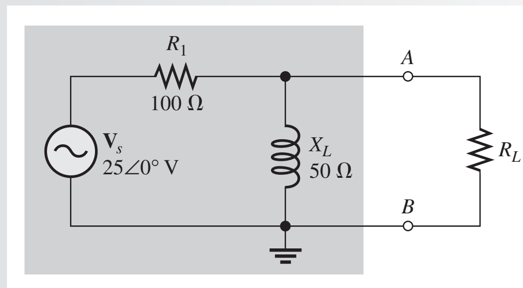


Problema relacionado Determine $\mathbf{Z}_{th}$ si R es de 22 kΩ y R_L de 39 kΩ en la figura 19-22.

Circuito equivalente de Thevenin

Los seis ejemplos previos mostraron cómo determinar los dos componentes equivalentes de un circuito Thevenin, $\mathbf{V}_{th}$ y $\mathbf{Z}_{th}$. Tenga en cuenta que se pueden determinar $\mathbf{V}_{th}$ y $\mathbf{Z}_{th}$ para cualquier circuito. Una vez que se determinan estos valores equivalentes, habrá que conectarlos en serie para formar el circuito equivalente de Thevenin. Los tres ejemplos siguientes utilizan los ejemplos previos para ilustrar este paso final.

EJEMPLO 19–10 Consulte la figura 19-24. Trace el equivalente de Thevenin para el circuito ubicado dentro del cuadro sombreado visto desde las terminales A y B. Este es el circuito utilizado en los ejemplos 19-4 y 19-7.

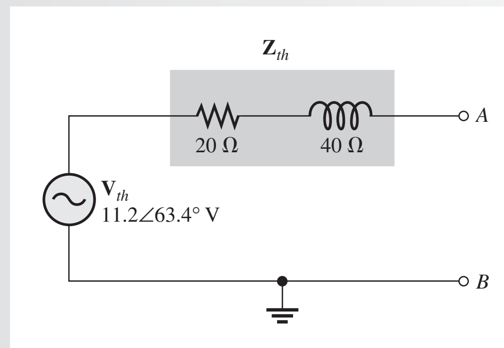


▲ **FIGURA 19–24**

Solución De acuerdo con los ejemplos 19-4 y 19-7, respectivamente, $\mathbf{V}_{th} = 11.2 \angle 63.4° \text{ V}$, y $\mathbf{Z}_{th} = 44.6 \angle 63.4° \ \Omega$. En forma rectangular, la impedancia es

$$\mathbf{Z}_{th} = 20\ \Omega + j40\ \Omega$$

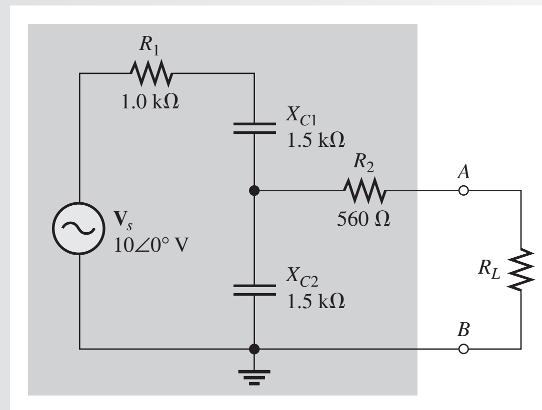
Esta forma indica que la impedancia es un resistor de 20 Ω dispuesto en serie con una reactancia inductiva de 40 Ω. El circuito equivalente de Thevenin se muestra en la figura 19-25.



▲ **FIGURA 19–25**

Problema relacionado Trace el circuito equivalente de Thevenin para la figura 19-24 con $R_1 = 47\ \Omega$.

EJEMPLO 19–11 Consulte la figura 19-26. Trace el equivalente de Thevenin para el circuito ubicado dentro del cuadro sombreado visto desde las terminales *A* y *B*. Este es el circuito utilizado en los ejemplos 19-5 y 19-8.

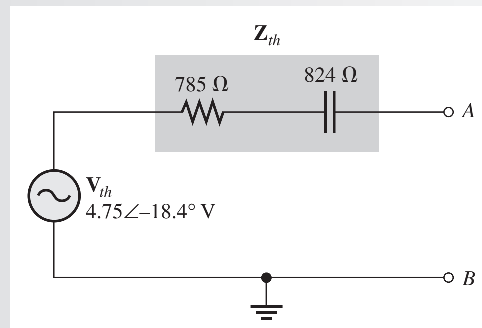


▲ **FIGURA 19–26**

Solución De acuerdo con los ejemplos 19-5 y 19-8, respectivamente, $\mathbf{V}_{th} = 4.75\angle -18.4°$ V, y $\mathbf{Z}_{th} = 1138\angle -46.4°\ \Omega$. En forma rectangular, la impedancia es

$$\mathbf{Z}_{th} = 785\ \Omega - j824\ \Omega$$

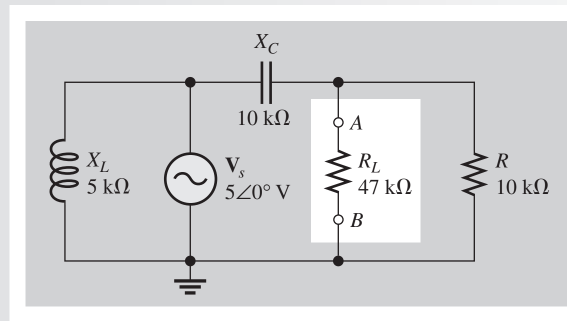
El circuito equivalente de Thevenin se muestra en la figura 19-27.



▲ **FIGURA 19–27**

Problema relacionado Trace el equivalente de Thevenin para el circuito de la figura 19-26 con $R_1 = 2.2$ kΩ.

EJEMPLO 19–12 Consulte la figura 19-28. Trace el equivalente de Thevenin para el circuito ubicado dentro del cuadro sombreado visto desde las terminales *A* y *B*. Este es el circuito utilizado en los ejemplos 19-6 y 19-9.



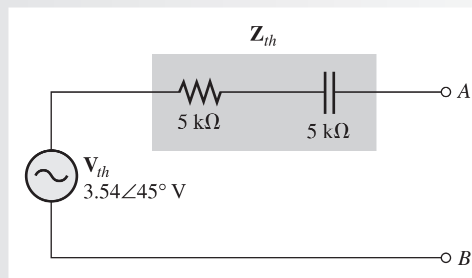
▲ FIGURA 19–28

Solución De acuerdo con los ejemplos 19-6 y 19-9, respectivamente, $\mathbf{V}_{th} = 3.54 \angle 45°$ V, y $\mathbf{Z}_{th} = 7.07 \angle -45°$ kΩ. La impedancia en forma rectangular es

$$\mathbf{Z}_{th} = 5\text{ k}\Omega - j5\text{ k}\Omega$$

Por tanto, el circuito equivalente de Thevenin se muestra en la figura 19-29.

▶ FIGURA 19–29



Problema relacionado Cambie R a 22 kΩ y R_L a 39 kΩ en la figura 19-28 y trace el circuito equivalente de Thevenin.

Resumen del teorema de Thevenin

Recuerde que el circuito equivalente de Thevenin siempre es una fuente de voltaje dispuesta en serie con una impedancia, sin importar el circuito original que reemplaza. La importancia del teorema de Thevenin es que el circuito equivalente puede reemplazar al circuito original por lo que concierne a cualquier carga externa. Cualquier carga conectada entre las terminales de un circuito equivalente de Thevenin experimenta la misma corriente y el mismo voltaje como si estuviera conectada a las terminales del circuito original.

A continuación se proporciona un resumen de los pasos necesarios para aplicar el teorema de Thevenin.

Paso 1. Abrir las dos terminales entre las que se desea determinar el circuito de Thevenin. Esto se logra retirando el componente desde donde se va a ver el circuito.

Paso 2. Determinar el voltaje entre las dos terminales abiertas.

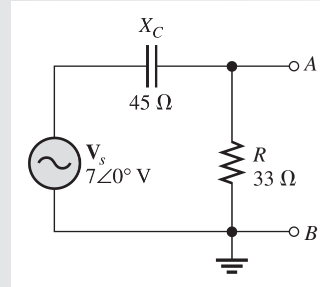
Paso 3. Determinar la impedancia vista desde las dos terminales abiertas con las fuentes de voltaje ideales habiendo sido reemplazadas por cortos y las fuentes de corriente ideales reemplazadas con aberturas (ajustadas a cero).

Paso 4. Conectar $\mathbf{V}_{th}$ y $\mathbf{Z}_{th}$ en serie para producir el circuito equivalente de Thevenin completo.

REPASO DE LA SECCIÓN 19-2

1. ¿Cuáles son los dos componentes básicos del equivalente de Thevenin para un circuito de ca?
2. Para cierto circuito, $Z_{th} = 25\ \Omega - j50\ \Omega$, y $V_{th}\ 5 = \angle 0°$ V. Trace el circuito equivalente de Thevenin.
3. Para el circuito de la figura 19-30, determine el equivalente de Thevenin viendo desde las terminales *A* y *B*.

▶ FIGURA 19–30



19–3 TEOREMA DE NORTON

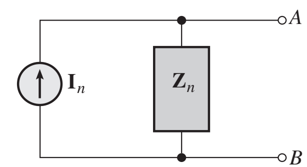
Igual que el teorema de Thevenin, el teorema de Norton proporciona un método útil para reducir un circuito complejo a una forma más simple y manejable con fines de análisis. La diferencia básica es que el **teorema de Norton** proporciona una fuente de corriente equivalente (en lugar de una fuente de voltaje) dispuesta en paralelo (en lugar de en serie) con una impedancia equivalente.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema de Norton para simplificar circuitos de ca reactivos**
  - Describir la forma de un circuito equivalente de Norton
  - Obtener la fuente de corriente ca equivalente de Norton
  - Obtener la impedancia equivalente de Norton

La forma de un circuito equivalente de Norton se muestra en la figura 19-31. Sin importar cuán complejo sea el circuito original, es posible reducirlo a esta forma equivalente. La fuente de corriente equivalente se designa mediante $\mathbf{I}_n$, y la impedancia equivalente es $\mathbf{Z}_n$ (el subíndice en minúscula cursiva denota una cantidad de ca).

El teorema de Norton muestra cómo determinar $\mathbf{I}_n$ y $\mathbf{Z}_n$. Una vez que se determinan, simplemente se les conecta en paralelo para obtener el circuito equivalente de Norton completo.



▲ FIGURA 19–31

Circuito equivalente Norton.

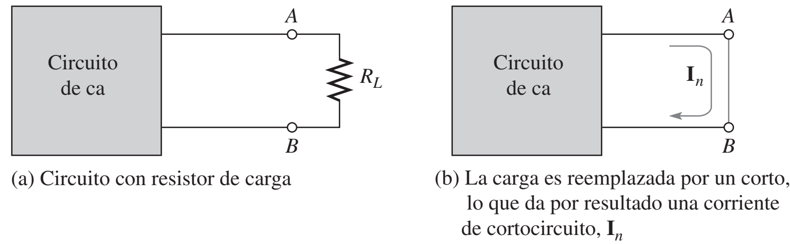
Fuente de corriente equivalente de Norton ($\mathbf{I}_n$)

$\mathbf{I}_n$ es una parte del circuito equivalente de Norton; $\mathbf{Z}_n$ es la otra parte.

La corriente equivalente de Norton se define como la corriente que aparece al poner en cortocircuito las dos terminales específicas en un circuito dado.

Cualquier carga conectada entre estas dos terminales "ve" efectivamente una fuente de corriente $\mathbf{I}_n$ dispuesta en paralelo con $\mathbf{Z}_n$.

A modo de ilustración, supongamos que el circuito mostrado en la figura 19-32 tiene un resistor de carga conectado a las terminales *A* y *B*, como se indica en la parte (a), y se desea determinar



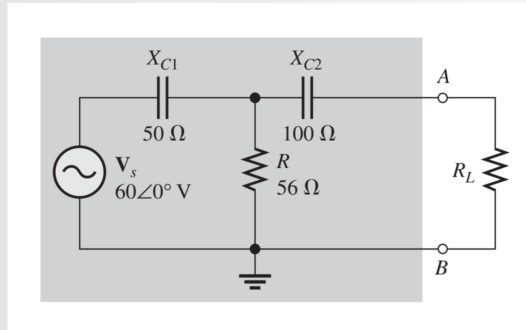
▲ **FIGURA 19–32**

Cómo se determina $\mathbf{I}_n$.

el equivalente de Norton visto desde las terminales *A* y *B*. Para determinar $\mathbf{I}_n$, encuentre la corriente entre las terminales *A* y *B* puestas en cortocircuito, según indica la parte (b). El ejemplo 19-13 muestra cómo determinar $\mathbf{I}_n$.

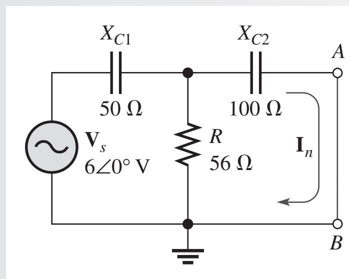
EJEMPLO 19–13 En la figura 19-33, determine $\mathbf{I}_n$ para el circuito "visto" por el resistor de carga. El área sombreada identifica la parte del circuito al que se le calculará el equivalente de Norton.

▶ **FIGURA 19–33**



Solución Ponga en cortocircuito las terminales *A* y *B*, como indica la figura 19-34.

▶ **FIGURA 19–34**



$\mathbf{I}_n$ es la corriente a través del corto y se calcula como sigue. En primer lugar, la impedancia total vista desde la fuente es

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X}_{C1} + \frac{\mathbf{RX}_{C2}}{\mathbf{R} + \mathbf{X}_{C2}} = 50\angle -90^\circ\ \Omega + \frac{(56\angle 0^\circ\ \Omega)(100\angle -90^\circ\ \Omega)}{56\ \Omega - j100\ \Omega}$$
$$= 50\angle -90^\circ\ \Omega + 48.9\angle -29.3^\circ\ \Omega$$
$$= -j50\ \Omega + 42.6\ \Omega - j23.9\ \Omega = 42.6\ \Omega - j73.9\ \Omega$$

Al convertir a forma polar se obtiene

$$\mathbf{Z} = 85.3\angle -60.0^\circ\ \Omega$$

A continuación, la corriente total producida por la fuente es

$$\mathbf{I}_s = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}} = \frac{6\angle 0°\text{ V}}{85.3\angle -60.0°\ \Omega} = 70.3\angle 60.0°\text{ mA}$$

Por último, aplique la fórmula del divisor de corriente para obtener $\mathbf{I}_n$ (la corriente a través del corto entre las terminales A y B).

$$\mathbf{I}_n = \left(\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{R} + \mathbf{X}_{C2}}\right)\mathbf{I}_s = \left(\frac{56\angle 0°\ \Omega}{56\ \Omega - j100\ \Omega}\right)70.3\angle 60.0°\text{ mA} = \mathbf{34.4\angle 121°\ mA}$$

Este es el valor para la fuente de corriente Norton equivalente.

Problema relacionado Determine $\mathbf{I}_n$ si $\mathbf{V}_s$ se cambia a 2.5 ∠ 0° V y R a 33 Ω en la figura 19-33.

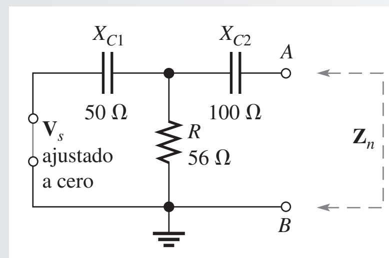
Impedancia equivalente de Norton ($\mathbf{Z}_n$)

$\mathbf{Z}_n$ se define igual que $\mathbf{Z}_{th}$: es la impedancia total que aparece entre dos terminales específicas de un circuito dado visto desde las terminales abiertas y con todas las fuentes reemplazadas por sus impedancias internas.

EJEMPLO 19–14 Determine $\mathbf{Z}_n$ para el circuito de la figura 19-33 (ejemplo 19-13) visto desde la abertura entre las terminales A y B.

Solución En primer lugar, reemplace $\mathbf{V}_s$ con su impedancia interna (cero), como indica la figura 19-35.

▶ FIGURA 19–35



Al ver entre las terminales A y B, C_2 está en serie con la combinación en paralelo de R y C_1. Por tanto,

$$\mathbf{Z}_n = \mathbf{X}_{C2} + \frac{\mathbf{R}\mathbf{X}_{C1}}{\mathbf{R} + \mathbf{X}_{C1}} = 100\angle -90°\ \Omega + \frac{(56\angle 0°\ \Omega)(50\angle -90°\ \Omega)}{56\ \Omega - j50\ \Omega}$$
$$= 100\angle -90°\ \Omega + 37.3\angle -48.2°\ \Omega$$
$$= -j100\ \Omega + 24.8\ \Omega - j27.8\ \Omega = \mathbf{24.8\ \Omega - j128\ \Omega}$$

La impedancia equivalente de Norton es una resistencia de 24.8 Ω dispuesta en serie con una reactancia capacitiva de 128 Ω.

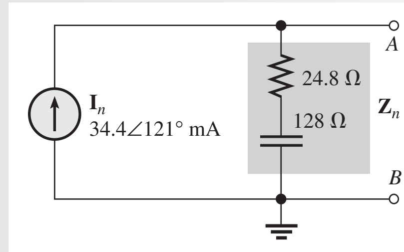
Problema relacionado Determine $\mathbf{Z}_n$ en la figura 19-33 si R = 33 Ω.

Los ejemplos 19-13 y 19-14 mostraron cómo determinar los dos componentes equivalentes de un circuito equivalente de Norton. Tenga en cuenta que estos valores pueden ser determinados para cualquier circuito de ca dado. Una vez conocidas $\mathbf{I}_n$ y $\mathbf{Z}_n$, se les conecta en paralelo para formar el circuito equivalente de Norton, tal como ilustra el ejemplo 19-15.

EJEMPLO 19–15 Muestre el circuito equivalente de Norton completo para el circuito de la figura 19-33 (ejemplo 19-13).

Solución De acuerdo con los ejemplos 19-13 y 19-14, respectivamente, $\mathbf{I}_n = 34.4 \angle 121°$ mA y $\mathbf{Z}_n = 24.8\ \Omega - j128\ \Omega$. El circuito equivalente de Norton se muestra en la figura 19-36.

▶ FIGURA 19–36



Problema relacionado Muestre el equivalente de Norton para el circuito de la figura 19-33 si $\mathbf{V}_s = 2.5 \angle 0°$ V y $R = 33\ \Omega$.

Resumen del teorema de Norton

Cualquier carga conectada entre las terminales de un circuito equivalente de Norton experimentará la misma corriente a través de ella y el mismo voltaje entre sus extremos como si estuviera conectada a las terminales del circuito original. Un resumen de los pasos para la aplicación teórica del teorema de Norton es como sigue:

Paso 1. Reemplazar la carga conectada a las dos terminales entre las cuales se va a determinar el circuito de Norton con un corto.

Paso 2. Determinar la corriente a través del corto. Ésta es $\mathbf{I}_n$.

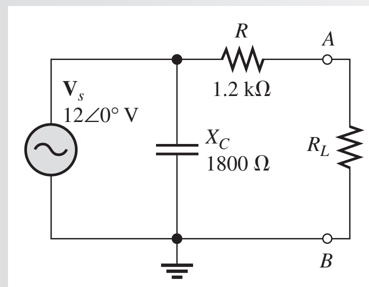
Paso 3. Abrir las terminales y determinar la impedancia entre las dos terminales abiertas y con todas las fuentes reemplazadas por sus impedancias internas. Ésta es $\mathbf{Z}_n$.

Paso 4. Conectar $\mathbf{I}_n$ y $\mathbf{Z}_n$ en paralelo.

REPASO DE LA SECCIÓN 19-3

1. Para un circuito dado, $\mathbf{I}_n = 5 \angle 0°$ mA, y $\mathbf{Z}_n = 150\ \Omega + j100\ \Omega$. Trace el circuito equivalente de Norton.
2. Determine el circuito de Norton visto por R_L en la figura 19-37.

▶ FIGURA 19–37



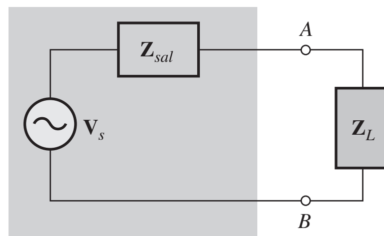
19–4 TEOREMA DE MÁXIMA TRANSFERENCIA DE POTENCIA

Se transfiere potencia máxima a una carga conectada a un circuito cuando la impedancia total es el complejo conjugado de la impedancia de salida del circuito.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Aplicar el teorema máxima transferencia de potencia**
  - Explicar el teorema
  - Determinar el valor de impedancia de la carga con el cual se transfiere potencia máxima desde un circuito dado

El **complejo conjugado** de $R - jX_C$ es $R + jX_L$ y viceversa, donde las resistencias son iguales en magnitud y las reactancias también iguales en magnitud pero de signo opuesto. La impedancia de salida es efectivamente la impedancia equivalente de Thevenin vista desde las terminales de salida. Cuando $\mathbf{Z}_L$ es el complejo conjugado de $\mathbf{Z}_{sal}$, se transfiere potencia máxima desde el circuito hasta la carga con un factor de potencia de 1. En la figura 19-38 se muestra un circuito equivalente con su carga e impedancia de salida.



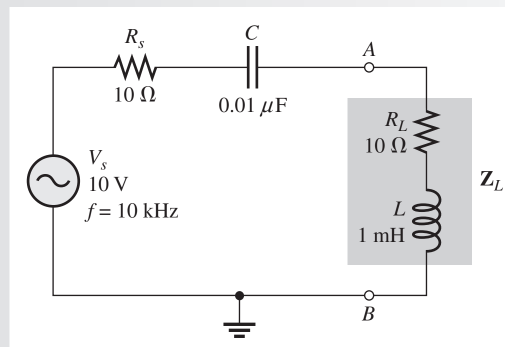
◀ **FIGURA 19–38**

Circuito equivalente con carga.

El ejemplo 19-16 muestra que la potencia máxima ocurre cuando se acoplan las impedancias conjugadamente.

EJEMPLO 19–16

El circuito ubicado a la izquierda de las terminales *A* y *B* en la figura 19-39 suministra potencia a la carga $\mathbf{Z}_L$. Este circuito puede ser considerado como un amplificador de potencia que suministra potencia a una carga compleja. Es el equivalente de Thevenin de un circuito más



▲ **FIGURA 19–39**

complejo. Calcule y trace una gráfica de la potencia suministrada a la carga para cada una de las siguientes frecuencias: 10 kHz, 30 kHz, 50 kHz, 80 kHz, y 100 kHz.

Solución Para $f = 10$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(10\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 1.59\text{ k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(10\text{ kHz})(1\text{ mH}) = 62.8\ \Omega$$

La magnitud de la impedancia total es

$$Z_{tot} = \sqrt{(R_s + R_L)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (1.53\text{ k}\Omega)^2} = 1.53\text{ k}\Omega$$

La corriente es

$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\text{ V}}{1.53\text{ k}\Omega} = 6.54\text{ mA}$$

La potencia suministrada a la carga es

$$P_L = I^2R_L = (6.54\text{ mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{428\ \mu W}$$

Para $f = 30$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(30\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 531\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi(30\text{ kHz})(1\text{ mH}) = 189\ \Omega$$

$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (342\ \Omega)^2} = 343\ \Omega$$

$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\text{ V}}{343\ \Omega} = 29.2\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (29.2\text{ mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{8.53\ mW}$$

Para $f = 50$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(50\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 318\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi(50\text{ kHz})(1\text{ mH}) = 314\ \Omega$$

Advierta que X_C y X_L son casi iguales, lo cual permite que las impedancias sean aproximadamente conjugados complejos. La frecuencia exacta a la cual $X_L = X_C$ es de 50.3 kHz.

$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (4\ \Omega)^2} = 20.4\ \Omega$$

$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\text{ V}}{20.4\ \Omega} = 490\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (490\text{ mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{2.40\ W}$$

Para $f = 80$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(80\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 199\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi(80\text{ kHz})(1\text{ mH}) = 503\ \Omega$$

$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (304\ \Omega)^2} = 305\ \Omega$$

$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\text{ V}}{305\ \Omega} = 32.8\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (32.8\text{ mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{10.8\ mW}$$

Para $f = 100$ kHz,

$$X_C = \frac{1}{2\pi(100\text{ kHz})(0.01\ \mu\text{F})} = 159\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi(100\text{ kHz})(1\text{ mH}) = 628\ \Omega$$

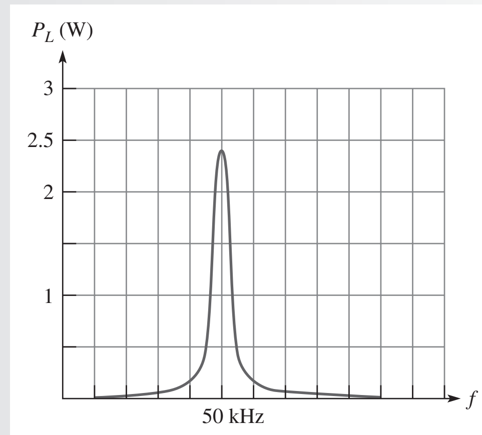
$$Z_{tot} = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (469\ \Omega)^2} = 469\ \Omega$$

$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{10\text{ V}}{469\ \Omega} = 21.3\text{ mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (21.3\text{ mA})^2(10\ \Omega) = \mathbf{4.54\ mW}$$

Como puede advertirse por los resultados, la potencia suministrada a la carga alcanza un valor máximo en la frecuencia (50 kHz) a la cual la impedancia de la carga es el complejo conjugado de la impedancia de salida (cuando las reactancias son iguales en magnitud). En la figura 19-40 se muestra una gráfica de potencia suministrada a la carga en función de la frecuencia. Como la potencia máxima es mucho más grande que los demás valores, resulta difícil trazar una gráfica precisa sin valores intermedios.

▶ **FIGURA 19–40**



Problema relacionado Si $R = 47\ \Omega$ y $C = 0.022\ \mu$F en un circuito *RC* dispuesto en serie, ¿cuál es el conjugado complejo de la impedancia a 100 kHz?



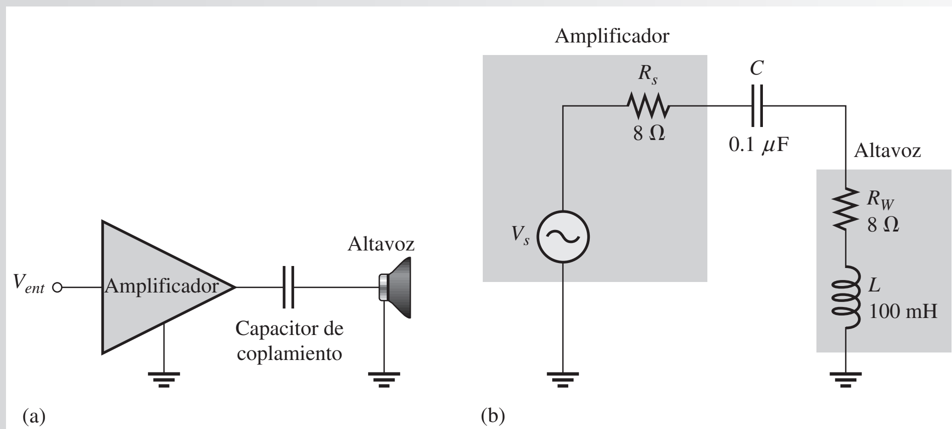
Use el archivo Multisim E19-16 para verificar los resultados calculados en este ejemplo.

El ejemplo 19-17 ilustra que la frecuencia en la cual ocurre la potencia máxima transferida a la carga es el valor que permite que la fuente y las impedancias de carga sean complejos conjugados.

EJEMPLO 19–17

(a) Determine la frecuencia a la cual la potencia máxima es transferida desde el amplificador hasta el altavoz en la figura 19-41(a). El amplificador y el capacitor de acoplamiento son la fuente y el altavoz es la carga, como se muestra en el circuito equivalente de la figura 19-41(b).

(b) ¿Cuántos watts de potencia se suministran al altavoz en esta frecuencia si $V_s = 3.8$ V rms?



▲ **FIGURA 19–41**

Solución **(a)** Cuando la potencia suministrada al altavoz es máxima, la impedancia de la fuente ($R_s - JX_C$) y la impedancia de la carga ($R_W + jX_L$) son complejos conjugados, por tanto

$$X_C = X_L$$

$$\frac{1}{2\pi fC} = 2\pi fL$$

Al resolver para f,

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100\text{ mH})(0.1\ \mu\text{F})}} \cong \mathbf{1.59\ kHz}$$

(b) Calcule la potencia suministrada al altavoz como sigue:

$$Z_{tot} = R_s + R_W = 8\ \Omega + 8\ \Omega = 16\ \Omega$$

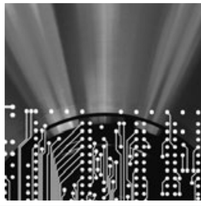
$$I = \frac{V_s}{Z_{tot}} = \frac{3.8\text{ V}}{16\ \Omega} = 238\text{ mA}$$

$$P_{max} = I^2R_W = (238\text{ mA})^2(8\ \Omega) = \mathbf{453\ mW}$$

Problema relacionado Determine la frecuencia a la cual es transferida la potencia máxima desde el amplificador hasta el altavoz en la figura 19-41 si el capacitor de acoplamiento es de 1 μF.

REPASO DE LA SECCIÓN 19-4

1. Si la impedancia de salida de cierto circuito de excitación es de 50 Ω − j10 Ω, ¿qué valor de impedancia de carga dará como resultado un suministro potencia máxima a la carga?
2. Para el circuito de la pregunta 1, ¿cuánta potencia se suministra a la carga cuando su impedancia es el complejo conjugado de la impedancia de salida y la corriente a través de la carga es de 2 A?

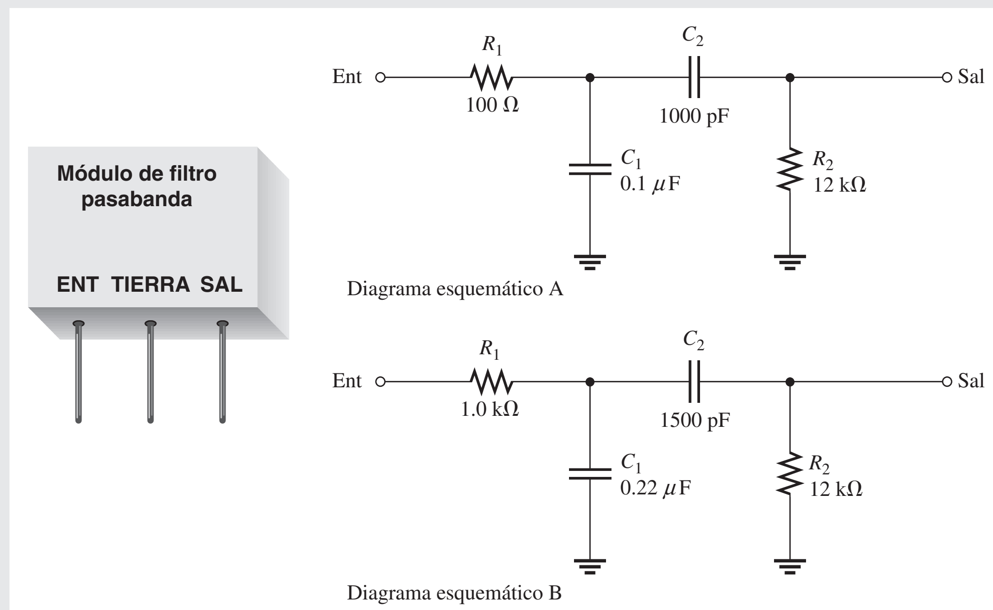


Una aplicación de circuito

En esta aplicación de circuito, se tiene un módulo filtro pasabanda sellado que se retiró de un sistema y dos diagramas esquemáticos. Ambos diagramas indican que el filtro pasabanda se implementó mediante una combinación de filtros pasabajas/pasaaltas. No hay certidumbre acerca de cuál diagrama corresponde al módulo filtro, pero uno de ellos es el que corresponde. Mediante ciertas mediciones, usted determinará cuál diagrama representa el filtro de modo que su circuito pueda ser reproducido. También, determinará la carga apropiada para transferencia de potencia máxima. El circuito filtro contenido en un módulo sellado y dos diagramas, uno de los cuales corresponde al circuito del filtro, se muestran en la figura 19-42

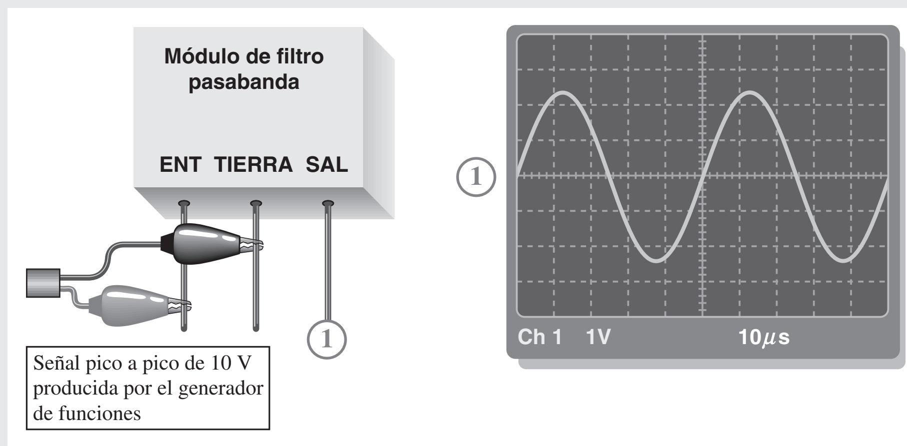
Mediciones y análisis del filtro

◆ Con base en mediciones de la salida del filtro realizadas con el osciloscopio mostrado en la figura 19-43, determine cuál diagrama de la figura 19-42 representa los valores de los compo-



▲ FIGURA 19–42

Módulo de filtro y diagramas esquemáticos.



▲ FIGURA 19–43

nentes del circuito del filtro en el módulo. Se aplica un voltaje de 10 V pico a pico a la entrada.

- Con base en la medición con el osciloscopio que aparece en la figura 19-43, determine si el filtro está funcionando a su frecuencia central aproximada.
- Use el teorema de Thevenin y determine la impedancia de carga que proporcionará la máxima transferencia de potencia a la frecuencia central cuando se conecte a la salida del filtro. Suponga que la impedancia de la fuente es de cero.

Repaso

1. Determine el voltaje de salida pico a pico a la frecuencia mostrada en la figura 19-43 del circuito de la figura 19-42 que se determinó no estar en el módulo.
2. Determine la frecuencia central del circuito mostrado en la figura 19-42 que se determinó no estar en el módulo.

RESUMEN

- El teorema de superposición es útil para el análisis tanto de circuitos de cd como de ca que tienen varias fuentes.
- El teorema de Thevenin proporciona un método para reducir cualquier circuito de ca a una forma equivalente compuesta de una fuente de voltaje equivalente dispuesta en serie con una impedancia equivalente.
- El término *equivalencia*, tal como se utiliza en los teoremas de Thevenin y de Norton, significa que cuando una impedancia de carga dada se conecta al circuito equivalente, tendrá el mismo voltaje entre sus extremos y la misma corriente a través de ella que cuando está conectada al circuito original.
- El teorema de Norton proporciona un método para reducir cualquier circuito de ca a una forma equivalente compuesta de una fuente de corriente equivalente dispuesta en paralelo con una impedancia equivalente.
- Se transfiere potencia máxima a una carga cuando la impedancia de carga es el complejo conjugado de la impedancia del circuito de control.

TÉRMINOS CLAVE

Estos términos clave también se encuentran en el glosario incluido al final del libro.

Circuito equivalente Circuito que produce el mismo voltaje y la misma corriente hacia una carga dada que el circuito original al que reemplaza.

Complejo conjugado Número complejo que tiene la misma parte real y una parte imaginaria de signo opuesto; impedancia que contiene la misma resistencia y una reactancia opuesta en fase pero de igual magnitud a la de una impedancia dada.

Teorema de Norton Método para simplificar un circuito de dos terminales en un circuito equivalente con sólo una fuente de corriente dispuesta en paralelo con una impedancia.

Teorema de superposición Método para efectuar el análisis de circuitos que tienen más de una fuente.

Teorema de Thevenin Método para simplificar un circuito de dos terminales en un circuito equivalente que tiene sólo una fuente de voltaje dispuesta en serie con una impedancia.

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Al aplicar el teorema de superposición,
(a) todas las fuentes se consideran al mismo tiempo
(b) todas las fuentes de voltaje se consideran al mismo tiempo
(c) las fuentes se consideran una a la vez siendo todas las demás reemplazadas por un corto
(d) las fuentes se consideran una a la vez siendo todas las demás reemplazadas por sus impedancias internas

2. Un circuito de ca equivalente de Thevenin siempre se compone de una fuente de voltaje de ca equivalente
(a) y una capacitancia equivalente
(b) y una reactancia inductiva equivalente
(c) y una impedancia equivalente
(d) dispuesta en serie con una reactancia capacitiva equivalente

3. Un circuito es equivalente a otro cuando
   (a) la misma carga tiene el mismo voltaje y la misma corriente cuando se conecta a cualquiera de ellos.
   (b) diferentes cargas tienen el mismo voltaje y la misma corriente cuando se conectan a cualquier circuito
   (c) los circuitos tienen fuentes de voltaje iguales e impedancias en serie iguales
   (d) los circuitos producen el mismo voltaje de salida
4. El voltaje equivalente de Thevenin es
   (a) el voltaje de circuito abierto (b) el voltaje puesto en cortocircuito
   (c) el voltaje a través de una carga equivalente (d) ninguno de los anteriores
5. La impedancia equivalente de Thevenin es la impedancia vista desde
   (a) la fuente con la salida en cortocircuito
   (b) la fuente con la salida abierta
   (c) dos terminales cualesquiera especificadas abiertas con todas las fuentes siendo reemplazadas por sus impedancias internas
   (d) dos terminales cualesquiera especificadas abiertas con todas las fuentes reemplazadas por un corto
6. El equivalente Norton de un circuito de ca siempre se compone de
   (a) una fuente de corriente de ca equivalente en serie con una impedancia equivalente
   (b) una fuente de corriente de ca equivalente en paralelo con una reactancia equivalente
   (c) una fuente de corriente de ca equivalente en paralelo con una impedancia equivalente
   (d) una fuente de voltaje de ca equivalente en paralelo con una impedancia equivalente
7. La corriente equivalente Norton es
   (a) la corriente total producida por la fuente
   (b) la corriente de cortocircuito
   (c) la corriente suministrada a una carga equivalente
   (d) ninguna de las anteriores respuestas
8. El complejo conjugado de $50\ \Omega + j100\ \Omega$ es de
   (a) $50\ \Omega - j50\ \Omega$ (b) $100\ \Omega + j50\ \Omega$ (c) $100\ \Omega - j50\ \Omega$ (d) $50\ \Omega - j100\ \Omega$
9. Para obtener la transferencia de potencia máxima desde una fuente capacitiva, la carga debe
   (a) tener una capacitancia igual a la capacitancia de la fuente
   (b) tener una impedancia igual en magnitud a la impedancia de la fuente
   (c) ser inductiva
   (d) tener una impedancia que es el complejo conjugado de la impedancia de la fuente
   (e) las respuestas (a) y (d)

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 19-47.

1. Si la fuente de voltaje de cd se puesta en cortocircuito, el voltaje en el punto *A* con respecto a tierra
   (a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
2. Si C_2 se abre, el voltaje en R_5
   (a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
3. Si C_2 se abre, el voltaje de cd en R_5
   (a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia

Consulte la figura 19-49(c).

4. Si V_2 se reduce a 0 V, el voltaje en R_L
   (a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia
5. Si la frecuencia de las fuentes de voltaje se incrementa, la corriente a través de R_L
   (a) aumenta (b) disminuye (c) no cambia

Consulte la figura 19-50.

6. Si la frecuencia de la fuente de voltaje se incrementa, el voltaje en R_1
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

7. Si R_L se abre, el voltaje en él
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 19-51.

8. Si la frecuencia de la fuente se incrementa, el voltaje a través de R_3
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

9. Si el valor del capacitor se reduce, la corriente producida por la fuente
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 19-54.

10. Si R_2 se abre, la corriente de la fuente de corriente
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

11. Si la frecuencia de la fuente de voltaje se incrementa, X_{C2}
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

12. Si se elimina la carga, el voltaje a través de R_3
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

13. Si se elimina la carga, el voltaje a través de R_2
(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

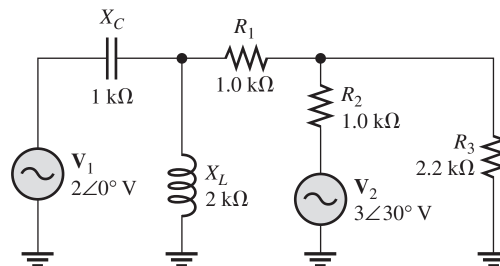
Los problemas más difíciles se indican con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 19–1 El teorema de superposición

1. Con el método de superposición, calcule la corriente a través de R_3 en la figura 19-44.

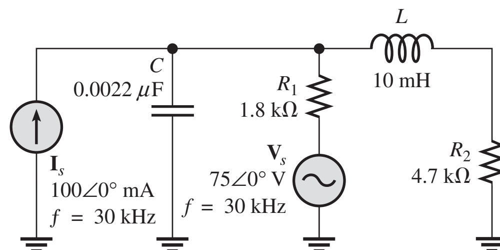
2. Use el teorema de superposición para determinar la corriente y el voltaje a través de la rama R_2 de la figura 19-44.

▶ FIGURA 19–44

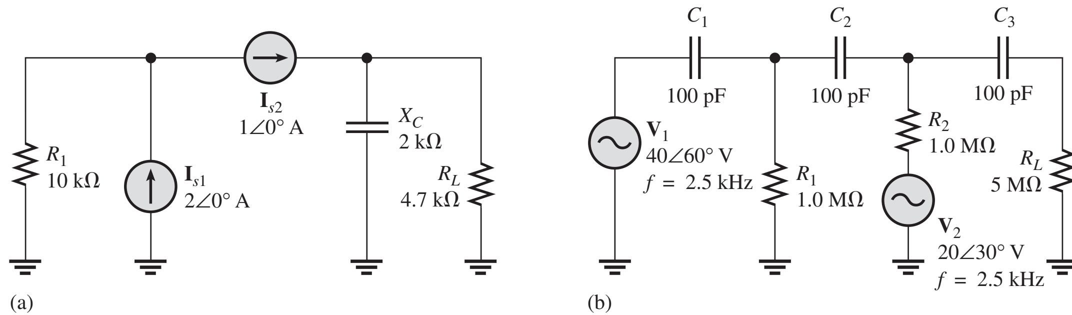


3. Con el teorema de superposición, calcule la corriente a través de R_1 en la figura 19-45.

▶ FIGURA 19–45



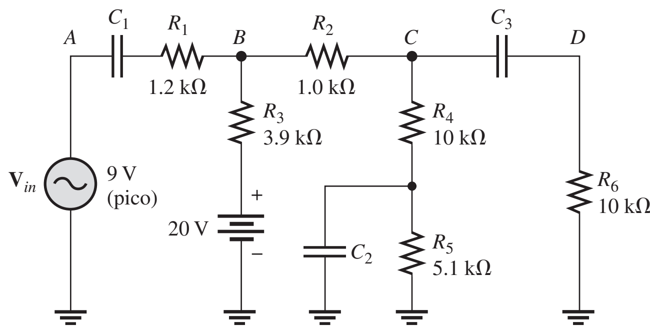
4. Con el teorema de superposición, determine la corriente a través de R_L en cada circuito de la figura 19-46.



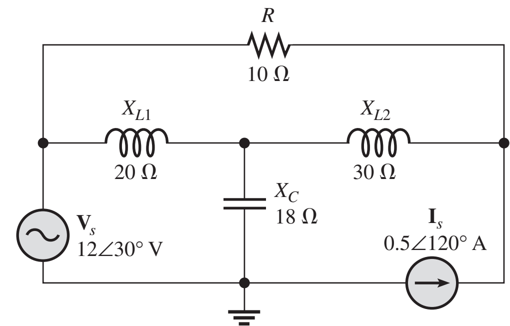
▲ FIGURA 19–46

*5. Determine el voltaje en cada punto (*A*, *B*, *C*, *D*) señalado en la figura 19-47. Suponga $X_C = 0$ para todos los capacitores. Trace las formas de onda de voltaje en cada punto.

*6. Use el teorema de superposición para determinar la corriente en el capacitor de la figura 19-48.



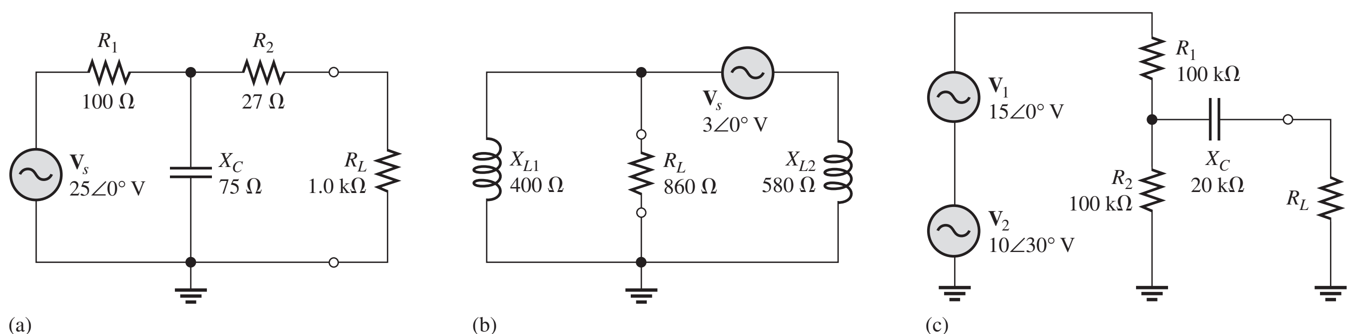
▲ FIGURA 19–47



▲ FIGURA 19–48

SECCIÓN 19–2 Teorema de Thevenin

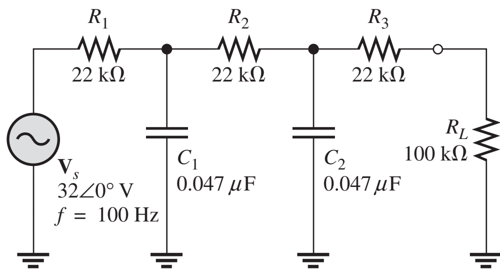
7. En cada circuito de la figura 19-49, determine el circuito equivalente de Thevenin para la parte vista por R_L.



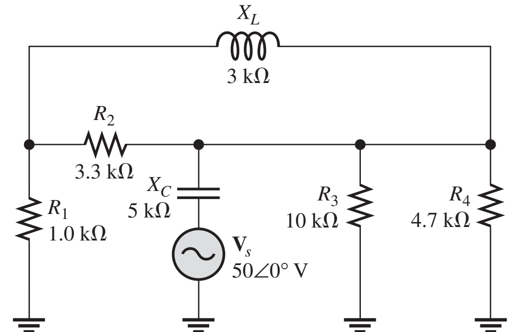
▲ FIGURA 19–49

8. Aplique el teorema de Thevenin y determine la corriente a través de la carga R_L en la figura 19-50.

***9.** Aplique el teorema de Thevenin y determine el voltaje en R_4 en la figura 19-51.

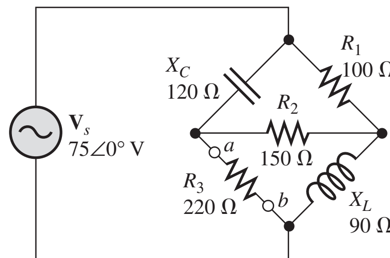


▲ FIGURA 19–50



▲ FIGURA 19–51

*** 10.** Simplifique el circuito externo a R_3 mostrado en la figura 19-52 a su equivalente de Thevenin.



▲ FIGURA 19–52

SECCIÓN 19–3 Teorema de Norton

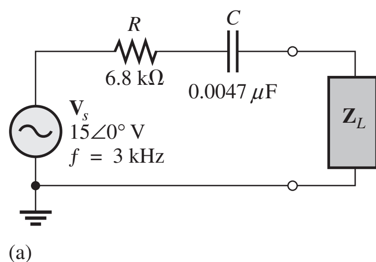
11. Para cada circuito de la figura 19-49, determine el equivalente de Norton visto por R_L.

12. Aplique el teorema de Norton y determine la corriente a través del resistor de carga R_L en la figura 19-50.

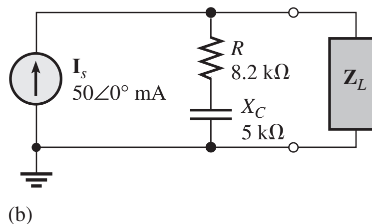
*** 13.** Aplique el teorema de Norton para determinar el voltaje en R_4 en la figura 19-51.

SECCIÓN 19–4 Teorema de máxima transferencia de potencia

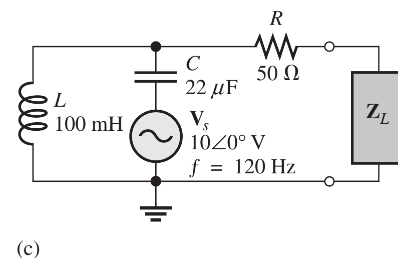
14. En cada circuito de la figura 19-53, se tiene que transferir potencia máxima a la carga R_L. Determine el valor apropiado para la impedancia de carga en todos los casos.



(a)



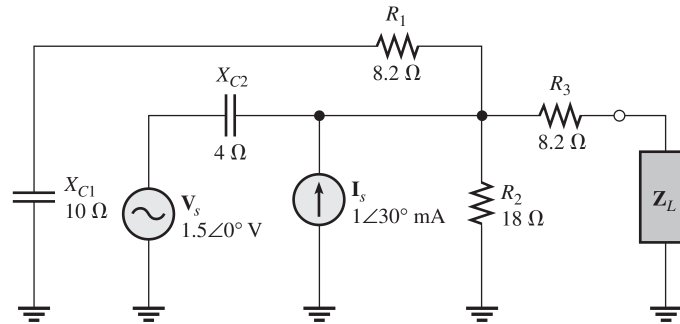
(b)



(c)

▲ FIGURA 19–53

* **15.** Determine $\mathbf{Z}_L$ para transferir potencia máxima en la figura 19-54.

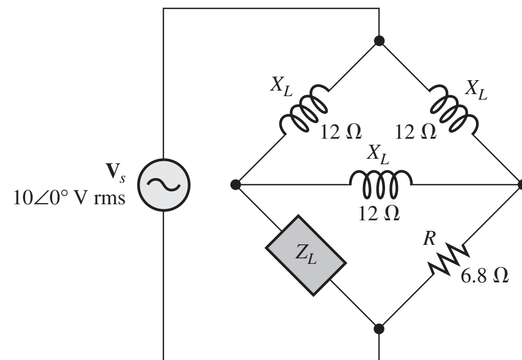


▲ **FIGURA 19–54**

***16.** Determine la impedancia de carga requerida para transferir potencia máxima a Z_L en la figura 19-55. Determine la potencia real máxima.

***17.** Se tiene que conectar una carga en el lugar de R_2 en la figura 19-52 para lograr transferencia de potencia máxima. Determine el tipo de carga y exprésela en forma rectangular.

► **FIGURA 19–55**





Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren el uso del CD-ROM Multisim.

18. Abra el archivo P19-18 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

19. Abra el archivo P19-19 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

20. Abra el archivo P19-20 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

21. Abra el archivo P19-21 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

22. Abra el archivo P19-22 y determine el circuito equivalente de Thevenin mediante medición viendo desde el punto *A*.

23. Abra el archivo P19-23 y determine el circuito equivalente de Norton mediante medición viendo desde el punto *A*.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 19–1 El teorema de superposición

1. La corriente neta es de cero.

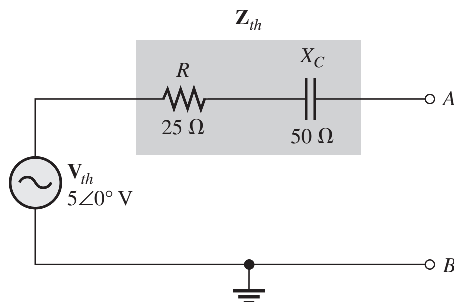
2. El circuito puede ser analizado una fuente a la vez por medio de superposición.

3. $I_R = 12$ mA

SECCIÓN 19–2 Teorema de Thevenin

1. Los componentes del equivalente de Thevenin de un circuito de ca son una fuente de voltaje equivalente y a una impedancia equivalente en serie.
2. Vea la figura 19-56.
3. $\mathbf{Z}_{th} = 21.5\ \Omega - j15.7\ \Omega$; $\mathbf{V}_{th} = 4.14\angle 53.8°\ \text{V}$

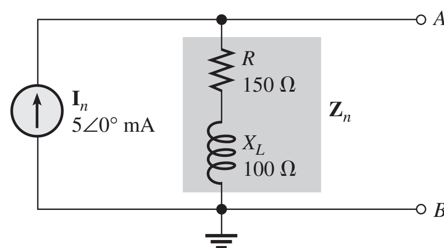
▶ FIGURA 19–56



SECCIÓN 19–3 Teorema de Norton

1. Vea la figura 19-57.
2. $\mathbf{Z}_n = R\angle 0° = 1.2\angle 0°\ \text{k}\Omega$; $\mathbf{I}_n = 10\angle 0°\ \text{mA}$

▶ FIGURA 19–57



SECCIÓN 19–4 Teorema de transferencia de potencia máxima

1. $\mathbf{Z}_L = 50\ \Omega + j10\ \Omega$
2. $P_L = 200\ \text{W}$

Una aplicación de circuito

1. $\mathbf{V}_{sal} = 166\angle -66.1°\ \text{mV pp}$
2. $f_0 = 4.76\ \text{kHz}$

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

19–1 2.11∠−153° mA

19–2 30∠90° mA

19–3 1.69 ∠ 47.3° mA montado sobre un nivel de cd de 3 mA.

19–4 18.2∠43.2° V

19–5 4.03∠−36.3° V

19–6 4.55∠24.4° V

19–7 34.3∠43.2° Ω

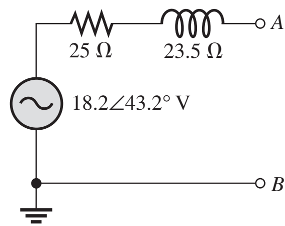
19–8 1.37∠−47.8° kΩ

19–9 9.10∠−65.6° kΩ

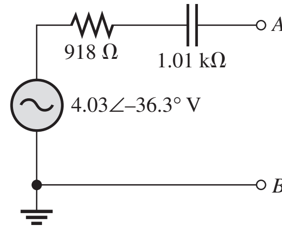
19–10 Vea la figura 19-58.

19–11 Vea la figura 19-59.

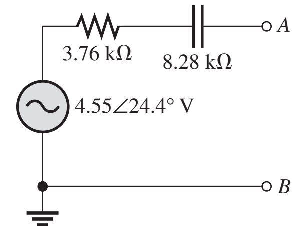
19–12 Vea la figura 19-60.



▲ FIGURA 19–58



▲ FIGURA 19–59



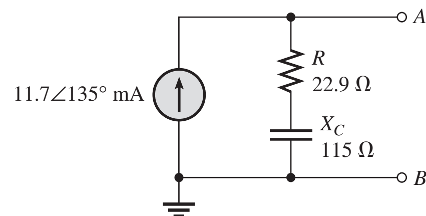
▲ FIGURA 19–60

19–13 11.7∠135° mA

19–14 117∠−78.7° Ω

19–15 Vea la figura 19-61.

▶ FIGURA 19–61



19–16 47 Ω + *j*72.3 Ω

19–17 503 Hz

AUTOEVALUACIÓN

1. (d) **2.** (c) **3.** (a) **4.** (a) **5.** (c)
6. (c) **7.** (b) **8.** (d) **9.** (d)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (c) **2.** (a) **3.** (c) **4.** (b) **5.** (a) **6.** (a) **7.** (a) **8.** (a)
9. (b) **10.** (c) **11.** (b) **12.** (b) **13.** (a)

20 RESPUESTA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CIRCUITOS REACTIVOS

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Explicar la operación de un integrador *RC*
- Analizar un integrador *RC* con un solo pulso de entrada
- Analizar un integrador *RC* con pulsos de entrada repetitivos
- Analizar un diferenciador *RC* con un solo pulso de entrada
- Analizar un diferenciador *RC* con pulsos de entrada repetitivos
- Analizar la operación de un integrador *RL*
- Analizar la operación de un diferenciador *RL*
- Explicar la relación de respuesta en función del tiempo a la respuesta a la frecuencia
- Localizar fallas en integradores *RC* y diferenciadores *RC*

TÉRMINOS CLAVE

- Integrador
- Constante de tiempo
- Tiempo transitorio
- Estado permanente
- Diferenciador
- Componente de cd

DESCRIPCIÓN PREVIA DE UNA APLICACIÓN DE CIRCUITO

En la aplicación de circuito, usted tendrá que especificar el alambrado eléctrico en un circuito con retardo de tiempo. También determinará los valores de los componentes para satisfacer ciertas especificaciones y calcular entonces los ajustes del instrumento para probar apropiadamente el circuito.

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En los capítulos 15 y 16, se abordó la respuesta a la frecuencia de circuitos *RC* y *RL*. En este capítulo, se examina la respuesta en función del tiempo de circuitos *RC* y *RL* con entradas de pulsos. Antes de iniciar este capítulo, se deberá revisar el material de las secciones 12-5 y 13-4. El entendimiento de los cambios exponenciales de voltajes y corrientes en capacitores e inductores es crucial para el estudio de la respuesta en función del tiempo. A lo largo de este capítulo, se utilizan fórmulas exponenciales proporcionadas en los capítulos 12 y 13.

Con entradas de pulsos, las respuestas de los circuitos en función del tiempo son importantes. En las áreas de circuitos pulsantes y digitales, a los técnicos les interesa saber a menudo cómo responde un circuito a lo largo de un intervalo de tiempo a cambios rápidos de voltaje o corriente. La relación de la constante de tiempo del circuito a características de pulsos de entrada, tales como ancho y periodo de un pulso, determina las formas de onda de los voltajes presentes en el circuito.

Los *términos integrador* y *diferenciador,* utilizados en todo este capítulo, se refieren a funciones matemáticas que son aproximadas por estos circuitos en ciertas condiciones de operación. La integración matemática es un proceso de cálculo de promedios, y la diferenciación matemática es un proceso para establecer una razón de cambio instantánea de alguna cantidad.

20–1 EL INTEGRADOR *RC*

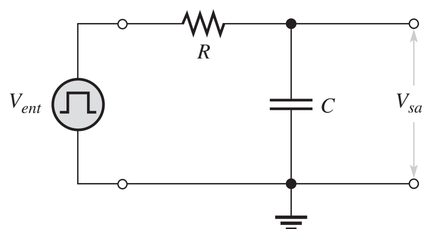
En términos de respuesta en función del tiempo, un circuito *RC* dispuesto en serie donde el voltaje de salida se toma entre los extremos del capacitor se conoce como **integrador**. Recordemos que en términos de respuesta a la frecuencia, dicho circuito es un filtro pasabajas. El término *integrador* se deriva del proceso matemático de integración, al cual este tipo de circuito aproximado bajo ciertas condiciones de operación.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar la operación de un integrador *RC***
  - Describir cómo se carga y descarga un capacitor
  - Explicar cómo reacciona un capacitor a un cambio instantáneo de voltaje o corriente
  - Describir la forma de onda básica del voltaje de salida

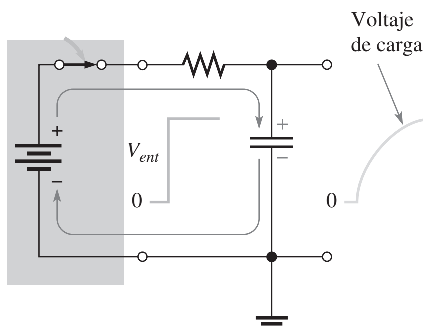
Carga y descarga de un capacitor

Cuando se conecta un generador de pulsos a la entrada de un integrador *RC*, como ilustra la figura 20-1, el capacitor se cargará y descargará en respuesta a los pulsos. Cuando la entrada va desde su nivel bajo hasta su nivel alto, el capacitor se carga hacia el nivel alto del pulso presente a través del resistor. Esta acción de carga es análoga a conectar una batería por medio de un interruptor cerrado al circuito *RC*, como ilustra la figura 20-2(a). Cuando el pulso va de su nivel alto a su nivel bajo, el capacitor se descarga de nuevo a través de la fuente. Comparada con la resistencia del resistor, se supone que la resistencia de la fuente es insignificante. Esta acción de descarga es análoga a reemplazar la fuente con un interruptor cerrado, como se ilustra en la figura 20-2(b).

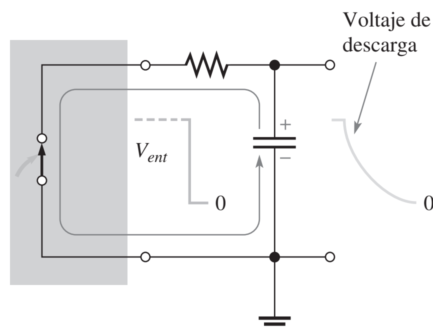


◀ FIGURA 20–1

Integrador *RC* conectado a un generador de pulsos.



(a) Cuando el pulso de entrada se va a su NIVEL ALTO, la fuente actúa efectivamente como una batería en serie con un interruptor cerrado, así se carga el capacitor



(b) Cuando el pulso de entrada se va a su NIVEL BAJO, la fuente actúa efectivamente como un interruptor cerrado, y proporciona una trayectoria de descarga para el capacitor

▲ FIGURA 20–2

Acción equivalente cuando una fuente de pulsos carga y descarga el capacitor.

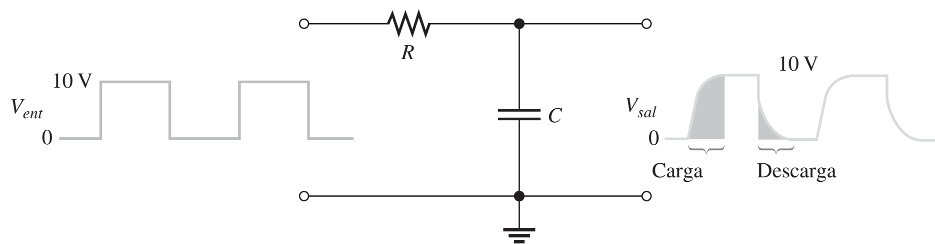
Como se aprendió en el capítulo 12, un capacitor se cargará y descargará siguiendo una curva exponencial. Su ritmo de carga y descarga, desde luego, depende de la **constante de tiempo** *RC*, un intervalo de tiempo fijo determinado por *R* y *C* ($\tau = RC$).

En el caso de un pulso ideal, ambos bordes se consideran instantáneos. Dos reglas básicas de comportamiento de un capacitor ayudan a entender la respuesta de circuitos *RC* a entradas de pulsos.

1. El capacitor aparece como un corto ante un cambio instantáneo de corriente y como una abertura ante cd.
2. El voltaje a través de un capacitor no puede cambiar instantáneamente sólo puede hacerlo exponencialmente.

Voltaje en un capacitor

En un integrador *RC*, la salida es el voltaje en el capacitor. El capacitor se carga durante el tiempo en que el pulso permanece alto. Si el pulso permanece a su nivel alto durante suficiente tiempo, el capacitor se cargará totalmente a la amplitud del voltaje del pulso, tal como ilustra la figura 20-3. El capacitor se descarga durante el tiempo que el pulso permanece bajo. Si el tiempo a nivel bajo entre pulsos es suficientemente largo, el capacitor se descargará totalmente hasta cero, como indica la figura. Luego que ocurra el siguiente pulso, se cargará otra vez.



▶ **FIGURA 20–3**

Ilustración de un capacitor cargándose y descargándose por completo en respuesta a una entrada de pulsos.

REPASO DE LA SECCIÓN 20-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. Defina el término integrador en relación con un circuito *RC*.
2. En un circuito *RC*, ¿qué provoca que el capacitor se cargue o descargue.

20–2 RESPUESTA DE UN INTEGRADOR *RC* A UN SOLO PULSO

De la sección previa, se tiene una idea general acerca de cómo responde un integrador *RC* a un pulso de entrada. En esta sección, la respuesta a un solo pulso se examina con todo detalle.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

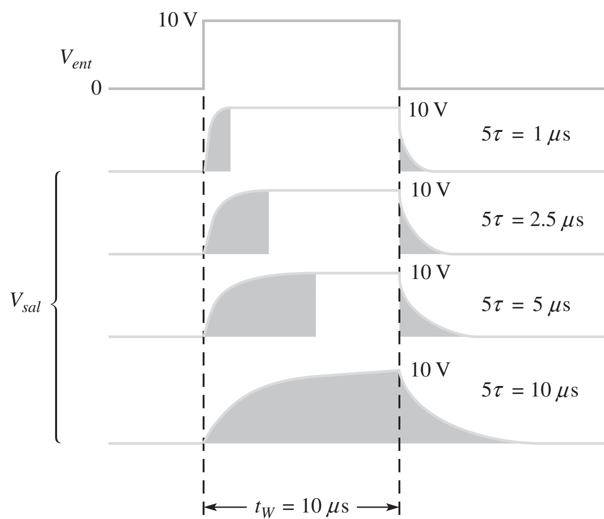
- **Analizar un integrador *RC* con un solo pulso de entrada**
  - Analizar la importancia de la constante de tiempo de circuito
  - Definir el término *tiempo transitorio*
  - Determinar la respuesta cuando el ancho de pulso es igual o mayor que cinco constantes de tiempo
  - Determinar la respuesta cuando el ancho de pulso es menor que cinco constantes de tiempo

Se deben considerar dos condiciones de respuesta a pulsos:

1. Cuando el ancho de pulso de entrada (t_W) es igual o mayor que cinco constantes de tiempo ($t_W \geq 5\tau$)
2. Cuando el ancho de pulso de entrada es menor que cinco constantes de tiempo ($t_W < 5\tau$)

Recuerde que se aceptan cinco constantes de tiempo como el tiempo requerido para que un capacitor se cargue o descargue totalmente; a este tiempo a menudo se le llama **tiempo transitorio**. Un capacitor se cargará totalmente si el ancho de pulso es igual o mayor que cinco constantes de tiempo (5τ). Esta condición se expresa como $t_W \geq 5\tau$. Al final del pulso, el capacitor se descarga totalmente de nuevo a través de la fuente.

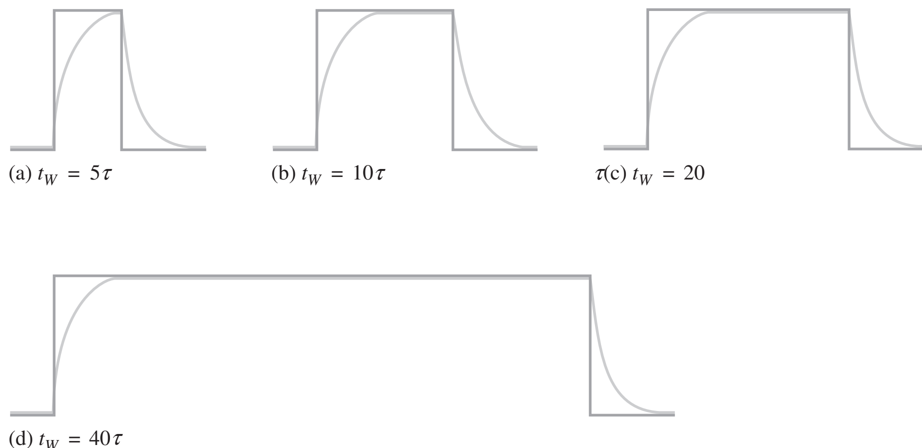
La figura 20-4 ilustra las formas de onda de salida para varios tiempos transitorios *RC* y un ancho de pulso de entrada fijo. Advierta que conforme se acorta el tiempo transitorio, en comparación con el ancho de pulso, la configuración del pulso de salida se aproxima a la del pulso de entrada. En cada caso, la salida alcanza la amplitud total de la entrada.



▲ **FIGURA 20–4**

Variación de la forma del pulso de salida de un integrador *RC* con la constante de tiempo. Las áreas sombreadas indican cuándo se está cargando o descargando el capacitor.

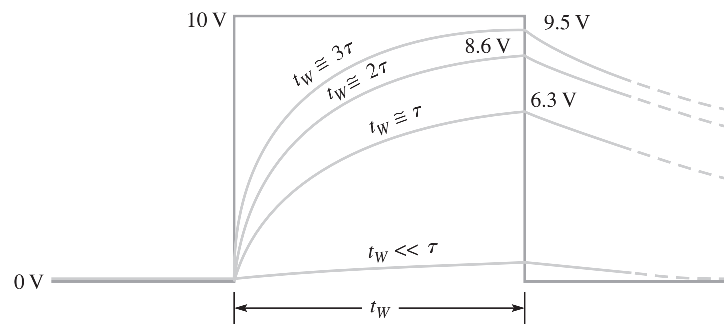
La figura 20-5 muestra cómo una constante de tiempo fija y un ancho de pulso de entrada variable afectan la salida del integrador. Observe que conforme el ancho de pulso se incrementa, la forma del pulso de salida se aproxima a la del pulso de entrada. De nuevo, esto significa que el tiempo transitorio es corto comparado con el ancho de pulso.



◀ **FIGURA 20–5**

Variación del ancho del pulso de entrada de un integrador *RC* (la constante de tiempo es fija). La línea gruesa es la entrada y la línea delgada es la salida.

A continuación se examinará el caso en que el ancho del pulso de entrada es menor que cinco constantes de tiempo del integrador *RC*. Esta condición se expresa como $t_W < 5\tau$. Como se sabe, el capacitor se carga mientras dura el pulso. Sin embargo, dado que el ancho de pulso es menor que el tiempo requerido por el capacitor para cargarse totalmente (5τ), el voltaje de salida *no* alcanzará el voltaje de entrada completo antes del final del pulso. El capacitor se carga sólo en parte, como ilustra la figura 20-6 para diversos valores de constantes de tiempo *RC*. Observe que con constantes de tiempo más largas, la salida alcanza un voltaje bajo porque el capacitor no puede cargarse tanto. Desde luego, en los ejemplos con entrada de un solo pulso, el capacitor se descarga totalmente después que el pulso termina.

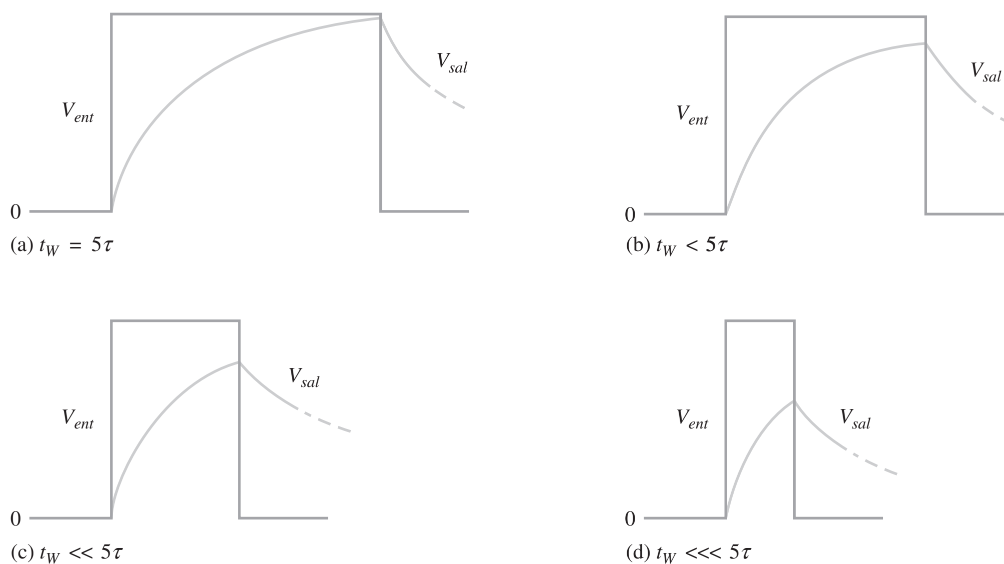


▲ **FIGURA 20–6**

Voltaje a través del capacitor con varias constantes de tiempo que son más largas que el ancho del pulso de entrada. La línea gruesa es la entrada y la línea delgada es la salida.

Cuando la constante de tiempo es mucho más grande que el ancho del pulso de entrada, el capacitor se carga muy poco, y, por consiguiente, el voltaje de salida llega a ser casi insignificante, como indica la figura 20-6.

La figura 20-7 ilustra el efecto de reducir el ancho del pulso de entrada en el caso de un valor de constante de tiempo fijo. Conforme el ancho del pulso de entrada se reduce, el voltaje de salida disminuye porque el capacitor dispone de menos tiempo para cargarse. No obstante, el capacitor se lleva aproximadamente el mismo tiempo (5τ) para descargarse de nuevo hasta cero en cada una de las condiciones una vez que cesa el pulso.



▲ **FIGURA 20–7**

El capacitor se carga cada vez menos conforme el ancho de pulso se reduce. La constante de tiempo es fija.

EJEMPLO 20–1

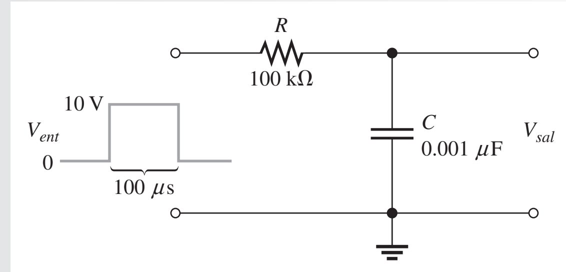
Se aplica un solo pulso de 10 V y 100 μs de ancho al integrador *RC* mostrado en la figura 20-8.

(a) ¿A qué voltaje se cargará el capacitor?

(b) ¿Cuánto tiempo se llevará el capacitor para descargarse si la resistencia interna del generador de pulsos es de 50 Ω?

(c) Trace la forma de onda del voltaje de salida.

▶ **FIGURA 20–8**



Solución

(a) La constante de tiempo del circuito es

$$\tau = RC = (100\text{ k}\Omega)(0.001\ \mu\text{F}) = 100\ \mu\text{s}$$

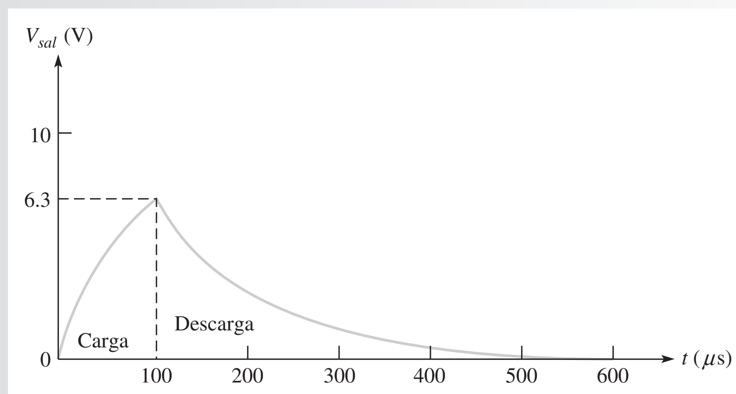
Advierta que el ancho de pulso es exactamente igual a la constante de tiempo. Por tanto, el capacitor se descargará aproximadamente un 63% de la amplitud de entrada total en una constante de tiempo, de modo que la salida alcanzará un voltaje máximo de

$$V_{sal} = (0.63)10\text{ V} = \mathbf{6.3\ V}$$

(b) El capacitor se descarga de nuevo a través de la fuente cuando el pulso termina. Se puede omitir la resistencia de 50 Ω de la fuente en serie con 100 kΩ. El tiempo de descarga total aproximado es, por consiguiente,

$$5\tau = 5(100\ \mu\text{s}) = \mathbf{500\ \mu s}$$

(c) La curva de carga y descarga de salida se muestra en la figura 20-9.



▲ **FIGURA 20–9**

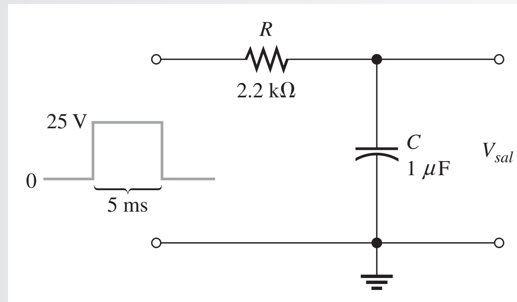
*Problema relacionado**

Si el ancho del pulso de entrada mostrado en la figura 20-8 se incrementa a 200 μs, ¿a qué voltaje se cargará el capacitor?

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

EJEMPLO 20–2 Determine cuánto se cargará el capacitor de la figura 20-10 cuando se aplica un solo pulso a la entrada.

▶ **FIGURA 20–10**



Solución Calcule la constante de tiempo.

$$\tau = RC = (2.2\,\text{k}\Omega)(1\,\mu\text{F}) = 2.2\,\text{ms}$$

Como el ancho de pulso es de 5 ms, el capacitor se carga durante 2.27 constantes de tiempo (5 ms/2.2 ms = 2.27). Use la fórmula exponencial del capítulo 12 (Ec. 12-19) para determinar el voltaje al cual se cargará el capacitor. Con $V_F = 25$ V y $t = 5$ ms, el cálculo es como sigue:

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC})$$
$$= (25\text{ V})(1 - e^{-5\text{ms}/2.2\text{ms}}) = (25\text{ V})(1 - e^{-2.27})$$
$$= (25\text{ V})(1 - 0.103) = (25\text{ V})(0.897) = \mathbf{22.4\text{ V}}$$

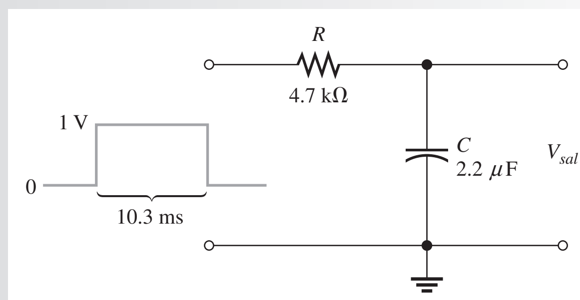
Estos cálculos indican que el capacitor se carga hasta 22.4 V durante la duración de 5 ms del pulso de entrada. Se descargará de nuevo hasta cero cuando el pulso regrese a cero.

Problema relacionado Determine cuánto se cargará el capacitor si el ancho del pulso es incrementado a 10 ms.

REPASO DE LA SECCION 20-2

1. Cuando se aplica un pulso de entrada a un integrador *RC*, ¿qué condiciones deben existir para que el voltaje de salida alcance su amplitud completa?
2. Para el circuito de la figura 20-11, el cual tiene un solo pulso de entrada, determine el voltaje de salida máximo y calcule durante cuánto tiempo se descargará el capacitor.
3. Para la figura 20-11, trace la forma aproximada del voltaje de salida con respecto al pulso de entrada.
4. Si la constante de tiempo de un integrador es igual al ancho del pulso de entrada, ¿se cargará por completo el capacitor?
5. Describa la condición en que el voltaje de salida tiene la forma aproximada de un pulso de entrada rectangular.

▶ **FIGURA 20–11**



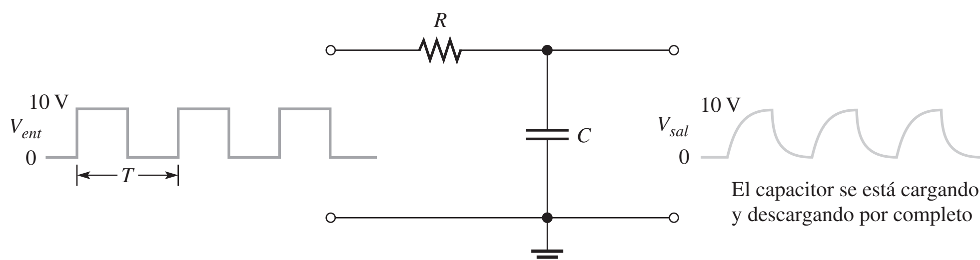
20–3 RESPUESTA DE INTEGRADORES *RC* A PULSOS REPETITIVOS

En sistemas electrónicos, se encontrarán formas de onda con pulsos repetitivos mucho más a menudo que pulsos únicos. Sin embargo, es necesario entender la respuesta de un integrador a pulsos únicos para comprender cómo responden estos circuitos a pulsos repetidos.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un integrador *RC* con pulsos de entrada repetitivos**
  - Determinar la respuesta cuando el capacitor se carga o descarga por completo
  - Definir el término *estado permanente* o estable
  - Describir el efecto de un incremento en la constante de tiempo en la respuesta del circuito

Cuando se aplica una forma de onda de pulso **periódico** a un integrador *RC*, como indica la figura 20-12, *la forma de onda de salida depende de la relación de la constante de tiempo del circuito y la frecuencia* (*periodo*) *de los pulsos de entrada*. El capacitor, desde luego, se carga y descarga en respuesta a una entrada de pulsos. La cantidad de carga y descarga del capacitor depende de la constante de tiempo del circuito y de la frecuencia de entrada, como ya se mencionó.

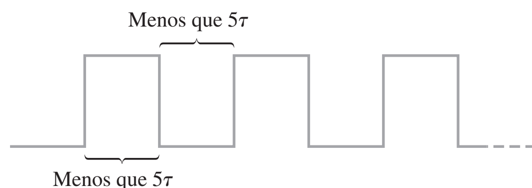


▲ **FIGURA 20–12**

Integrador *RC* con una entrada de forma de onda pulsante repetitiva ($T = 10\tau$).

Si el ancho de pulso y el tiempo entre pulsos son iguales o mayores que cinco constantes de tiempo, el capacitor se cargará y descargará por completo durante cada periodo (*T*) de la forma de onda de entrada. Este caso se ilustra en la figura 20-12.

Cuando el ancho de pulso y el tiempo entre pulsos son más cortos que cinco constantes de tiempo, como ilustra la figura 20-13, para el caso de una onda cuadrada, el capacitor *no* se cargará o descargará por completo. Ahora se examinarán los efectos de esta situación en el voltaje de salida del integrador *RC*.



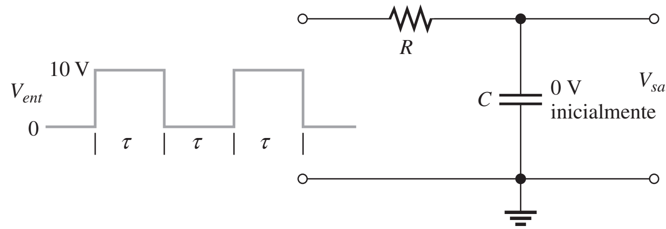
▲ **FIGURA 20–13**

Forma de onda de entrada que no permite la carga o descarga completas del capacitor en un integrador *RC*.

Como ilustración, utilicemos un integrador *RC* con constante de tiempo de carga y descarga igual al ancho del pulso de una entrada de onda cuadrada de 10 V, como se muestra en la figura 20-14. Esta opción simplificará el análisis y demostrará la acción básica del integrador en estas condiciones. En este momento, no interesa el valor exacto de la constante de tiempo porque se sabe que un circuito *RC* se carga aproximadamente al 63% durante un intervalo de constante de tiempo.

▶ **FIGURA 20–14**

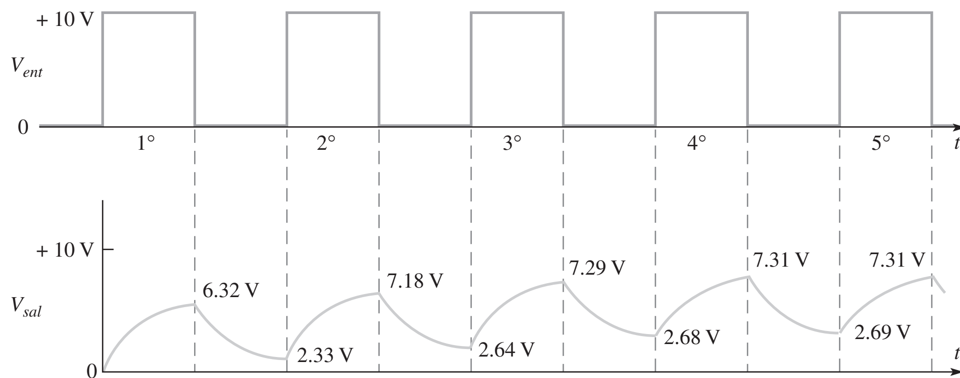
Integrador *RC* con una entrada de onda cuadrada cuyo periodo es igual a dos constantes de tiempo ($T = 2\tau$).



Suponga que el capacitor de la figura 20-14 inicialmente comienza a descargarse y examine el voltaje de salida pulso a pulso. La figura 20-15 muestra las formas de carga y descarga de cinco pulsos.

▶ **FIGURA 20–15**

Entrada y salida para el integrador inicialmente descargado de la figura 20-14.



Primer pulso Durante el primer pulso, el capacitor se carga. El voltaje de salida llega a 6.32 V (63.2% de 10 V), como indica la figura 20-15.

Entre los pulsos primero y segundo El capacitor se descarga y el voltaje disminuye al 36.8% del voltaje presente al principio de este intervalo: 0.368(6.32 V) = 2.33 V.

Segundo pulso El voltaje en el capacitor comienza en 2.33 V y se incrementa al 63.2% en 10 V. Este cálculo se realiza como sigue: el intervalo de carga total es de 10 V − 2.33 V = 7.67 V. El voltaje en el capacitor se incrementará un 63.2% adicional de 7.67 V, el cual es de 4.85 V. Por tanto, al final del segundo pulso, el voltaje de salida es de 2.33 V + 4.85 V = 7.18 V, como se muestra en la figura 20-15. Advierta que el promedio se está incrementando.

Entre los pulsos segundo y tercero El capacitor se descarga durante este tiempo, y por consiguiente el voltaje disminuye al 36.8% del voltaje inicial al final del segundo pulso: 0.368(7.18 V) = 2.64 V.

Tercer pulso Al principio del tercer pulso, el voltaje en el capacitor es de 2.64 V. El capacitor se carga un 63.2% del intervalo de 2.64 V a 10 V: 0.632(10 V − 2.64 V) = 4.65 V. Por consiguiente, el voltaje al final del tercer pulso es de 2.64 + 4.65 = 7.29 V.

Entre los pulsos tercero y cuarto El voltaje durante este intervalo disminuye a causa de la descarga del capacitor. Disminuirá al 36.8% de su valor hacia el final del tercer pulso. El voltaje final en este intervalo es de 0.368(7.29 V) = 2.68 V.

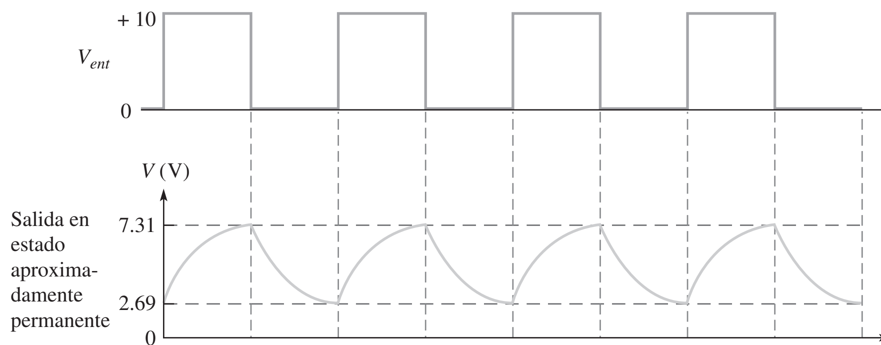
Cuarto pulso Al inicio del cuarto pulso, el voltaje en el capacitor es de 2.68 V. El voltaje se incrementa en 0.632(10 V − 2.68 V) = 4.63 V. Por consiguiente, al final del cuarto pulso, el voltaje en el capacitor es de 2.68 V + 4.63 V = 7.31 V. Advierta que los valores se están nivelando conforme los pulsos continúan.

Entre los pulsos cuarto y quinto Entre estos pulsos, el voltaje en el capacitor se reduce a 0.368(7.31 V) = 2.69 V.

Quinto pulso Durante el quinto pulso, el capacitor se carga en 0.632(10 V − 2.69 V) = 4.62 V. Como inició en 2.69 V, el voltaje al final del quinto pulso es de 2.69 V + 4.62 V = 7.31 V

Respuesta en función del tiempo en estado permanente

En el planteamiento anterior, el voltaje de salida se incrementó gradualmente y luego comenzó a nivelarse. Se requieren aproximadamente 5τ para que el voltaje de salida se incremente a un valor promedio constante. Este intervalo es el tiempo transitorio del circuito. Una vez que el voltaje de salida alcanza el valor promedio del voltaje de entrada, se alcanza una condición de **estado permanente** que continúa en tanto la entrada periódica esté presente. Esta condición se ilustra en la figura 20-16 con base en los valores obtenidos en el planteamiento anterior.



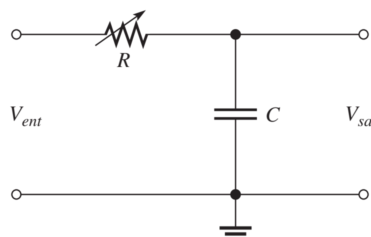
▲ **FIGURA 20–16**

La salida alcanza el estado permanente después de 5τ.

En este circuito de ejemplo, el tiempo transitorio es el tiempo transcurrido a partir del primer pulso hasta el final del tercero. La razón para este intervalo es que el voltaje en el capacitor al final del tercer pulso es de 7.29 V, el cual es aproximadamente un 99% del voltaje final.

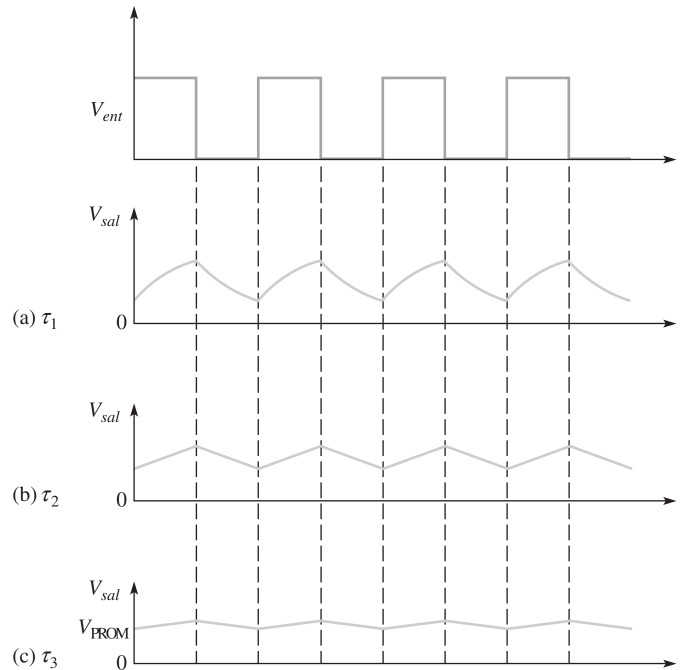
El efecto de un incremento en la constante de tiempo

¿Qué le sucede al voltaje de salida si la constante de tiempo *RC* del integrador se incrementa con un resistor variable, como ilustra la figura 20-17? Conforme se incrementa la constante de tiempo, el capacitor se carga menos durante un pulso y se descarga menos entre pulsos. El resultado



◀ **FIGURA 20–17**

Integrador con una constante de tiempo *RC* variable.



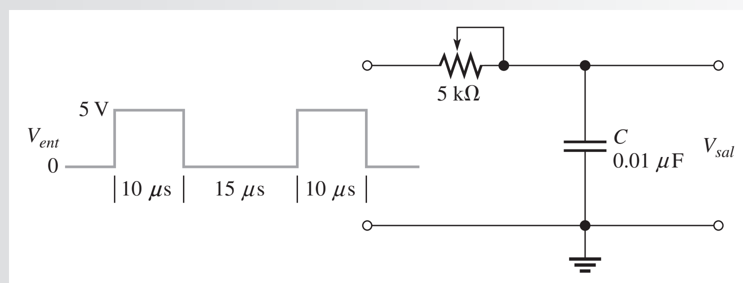
▲ **FIGURA 20–18**

Efecto de constantes de tiempo más largas en la salida de un integrador *RC* ($\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$).

es una fluctuación más pequeña en el voltaje de salida con valores crecientes de la constante de tiempo, como se muestra en la figura 20-18.

A medida que la constante de tiempo se vuelve extremadamente larga en comparación con el ancho de pulso, el voltaje de salida tiende a un voltaje de cd constante, como se muestra en la figura 20-18(c). Este valor es el valor promedio de la entrada. En el caso de una onda seno, es la mitad de la amplitud.

EJEMPLO 20–3 Determine la forma de onda del voltaje de salida para los primeros dos pulsos aplicados al integrador *RC* en la figura 20-19. Suponga que inicialmente el capacitor está descargado y que el reóstato se ajusta a 5 kΩ.



▲ **FIGURA 20–19**

Solución En primer lugar, calcule la constante de tiempo del circuito.

$$\tau = RC = (5\ \text{k}\Omega)(0.01\ \mu\text{F}) = 50\ \mu\text{s}$$

Desde luego, la constante de tiempo es mucho más larga que el ancho del pulso de entrada o el intervalo entre pulsos (observe que la entrada no es una onda cuadrada). En este caso, se deben aplicar las fórmulas exponenciales, y el análisis es relativamente difícil. Siga la solución con cuidado.

1. *Cálculo para el primer pulso*: use la ecuación apropiada para una exponencial creciente porque C está cargándose. Observe que V_F es de 5 V, y t es igual al ancho de pulso de 10 μs. Por consiguiente,

$$v_C = V_F(1 - e^{-t/RC}) = (5\text{ V})(1 - e^{-10\mu s/50\mu s})$$
$$= (5\text{ V})(1 - 0.819) = \mathbf{906\ mV}$$

Este resultado aparece en la gráfica de la figura 20-20(a).

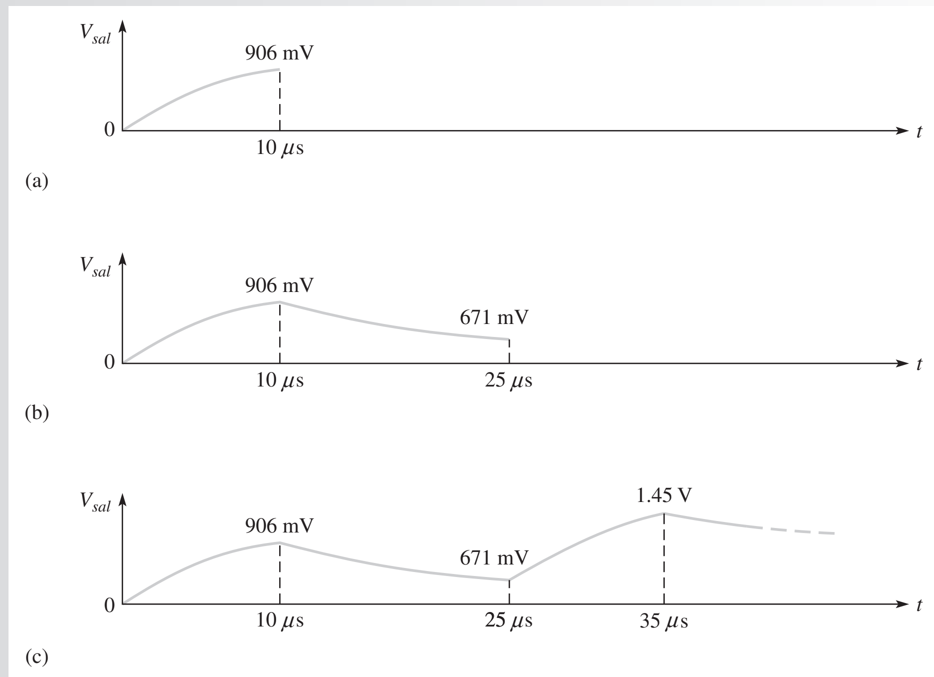
2. *Cálculo para el intervalo entre los pulsos primero y segundo*: use la ecuación para una exponencial decreciente porque C está descargándose. Observe que V_i es de 906 mV porque C comienza a descargarse a partir de este valor al final del primer pulso. El tiempo de descarga es de 15 μs. Por consiguiente,

$$v_C = V_i e^{-t/RC} = (906\text{ mV})e^{-15\mu s/50\mu s}$$
$$= (906\text{ mV})(0.741) = \mathbf{671\ mV}$$

Este resultado se muestra en la figura 20-20(b).

3. *Cálculo para el segundo pulso*: al principio del segundo pulso, el voltaje de salida es de 671 mV. Durante el segundo pulso, el capacitor se cargará de nuevo. En este caso, no parte de cero. Ya tiene 671 mV de la carga y descarga previas. Para manejar esta situación, se debe utilizar la fórmula exponencial general.

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau}$$



▲ **FIGURA 20–20**

Con esta ecuación, el voltaje a través del capacitor al final del segundo pulso se calcula como sigue:

$$v_C = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/RC}$$
$$= 5\text{ V} + (671\text{ mV} - 5\text{ V})e^{-10\mu s/50\mu s}$$
$$= 5\text{ V} + (-4.33\text{ V})(0.819) = 5\text{ V} - 3.55\text{ V} = \mathbf{1.45\text{ V}}$$

Este resultado se muestra en la figura 20-20(c).

Observe que la forma de onda de salida se incrementa en pulsos de entrada sucesivos. Después de aproximadamente 5τ, alcanzará su estado permanente y fluctuará entre un máximo y un mínimo constantes, con un promedio igual al valor promedio de la entrada. Se puede observar este patrón llevando el análisis efectuado en este ejemplo un poco más allá.

Problema relacionado Determine V_{sal} al principio del tercer pulso.



Use el archivo Multisim E20-03 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado.

REPASO DE LA SECCIÓN 20-3

1. ¿Qué condiciones permiten que un capacitor integrador RC se cargue y descargue por completo cuando se aplica una forma de onda de pulso periódico a la entrada?
2. ¿Qué apariencia tendrá la forma de onda de salida si la constante de tiempo del circuito es extremadamente corta en comparación con el ancho de pulso de una entrada de onda cuadrada?
3. ¿Cómo se llama el tiempo requerido para que el voltaje de salida se incremente a un valor promedio constante cuando 5τ es mayor que el ancho de pulso de una onda cuadrada de entrada?
4. Defina el concepto de *respuesta de estado permanente*.
5. ¿A qué es igual el valor promedio del voltaje de salida de un integrador durante el estado permanente?

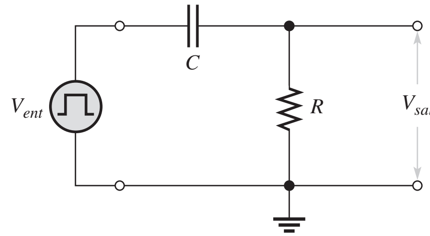
20–4 Respuesta de un diferenciador *RC* a un solo pulso

En términos de respuesta en función del tiempo, un circuito *RC* dispuesto en serie donde el voltaje de salida se toma entre los extremos de un resistor se conoce como **diferenciador**. Recuerde que en términos de respuesta a la frecuencia, es un filtro pasaaltas. El término *diferenciador* se deriva del proceso matemático de diferenciación, el cual representa en forma aproximada este tipo de circuito bajo ciertas condiciones.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un diferenciador *RC* con un solo pulso de entrada**
  - Describir la respuesta al borde ascendente del pulso de entrada
  - Determinar la respuesta durante y al final de un pulso para diversas relaciones de ancho de pulso-constante de tiempo

La figura 20-21 muestra un diferenciador *RC* con una entrada de pulso. En un diferenciador ocurre la misma acción que en un integrador, excepto que el voltaje de salida se toma a través del resistor y no a través del capacitor. El capacitor se carga exponencialmente a un ritmo que depende de la constante de tiempo *RC*. La acción de carga y descarga del capacitor determina la forma del voltaje en el resistor del diferenciador.



◀ FIGURA 20–21

Diferenciador *RC* con un generador de pulsos conectado.

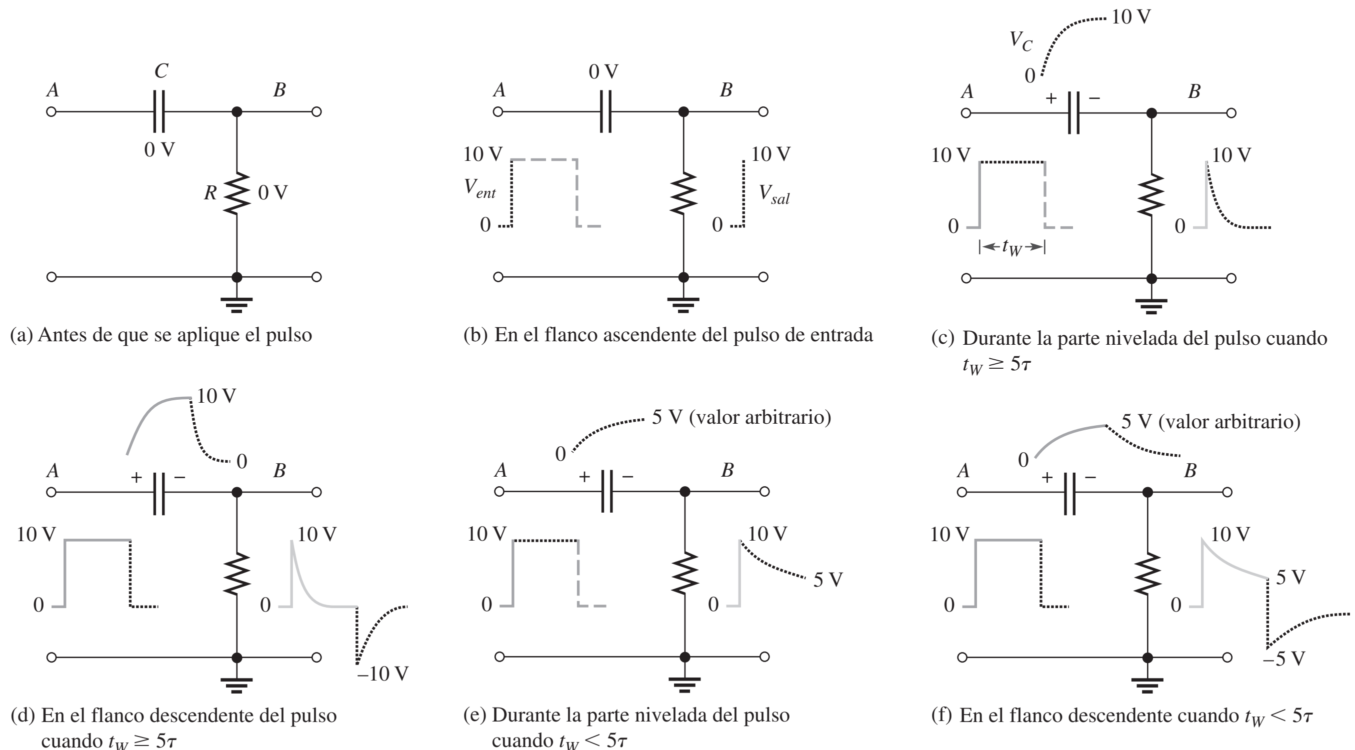
Respuesta al pulso

Para entender cómo es conformado el voltaje de entrada por un diferenciador, se debe considerar lo siguiente:

1. La respuesta al borde del pulso ascendente
2. La respuesta entre los bordes ascendente y descendente
3. La respuesta al borde del pulso descendente

Respuesta al flanco ascendente del pulso de entrada Suponga que el capacitor inicialmente está descargado antes del flanco ascendente del pulso de entrada. Antes del pulso, la entrada es de cero volts. Por tanto, hay cero volts a través del capacitor y cero volts a través del resistor, como se indica en la figura 20-22(a).

Asuma también que se aplica un pulso de 10 V a la entrada. Cuando ocurre el flanco ascendente, el punto *A* se va a +10 V. Recuerde que el voltaje entre las terminales de un capacitor no cambia instantáneamente, y por tanto el capacitor aparece instantáneamente como un corto. Por consiguiente, si el punto *A* se va instantáneamente a +10 V, entonces el punto *B* también *debe* irse instantáneamente a +10 V, y el voltaje en el capacitor se mantiene en cero para el instante del flanco ascendente. El voltaje en el capacitor es el voltaje desde el punto *A* hasta el punto *B*.



▲ FIGURA 20–22

Ejemplos de la respuesta de un diferenciador *RC* a un solo pulso de entrada en dos condiciones: $t_W \geq 5\tau$ y $t_W < 5\tau$.

El voltaje en el punto *B* con respecto a tierra es el voltaje entre los extremos del resistor (y el voltaje de salida). Por tanto, el voltaje de salida repentinamente se va a +10 V en respuesta al flanco ascendente del pulso, como indica la figura 20-22(b).

Respuesta durante el pulso cuando $t_W \geq 5\tau$ En tanto el pulso se encuentra en su nivel alto entre el flanco ascendente y el flanco descendente, el capacitor se carga. Cuando el ancho de pulso es igual o más grande que cinco constantes de tiempo ($t_W \geq 5\tau$), el capacitor tiene tiempo para cargarse por completo.

Conforme el voltaje en el capacitor se incrementa exponencialmente, el voltaje en el resistor disminuye exponencialmente hasta llegar a cero volts en el instante en que el capacitor se carga por completo (+10 V en este caso). Esta reducción de voltaje en el resistor ocurre porque la suma de los voltajes entre las terminales del capacitor y del resistor en cualquier instante debe ser igual al voltaje aplicado, en cumplimiento de la ley de voltajes de Kirchhoff ($v_C + v_R = v_{ent}$). Esta parte de la respuesta se ilustra en la figura 20-22(c)

Respuesta al flanco descendente cuando $t_W \geq 5\tau$ Examinemos el caso en que el capacitor se carga por completo al final del pulso ($t_W \geq 5\tau$). Consulte la figura 20-22(d). En el flanco descendente, el pulso de entrada repentinamente se va de +10 V de nuevo a cero. Un instante antes del flanco descendente, el capacitor se carga a 10 V, por lo que el punto *A* está a +10 V y el punto *B* a 0 V. El voltaje entre las terminales del capacitor no cambia instantáneamente, así que cuando el punto *A* experimenta una transición desde +10 V hasta cero en el flanco descendente, el punto *B* también *debe* experimentar una transición de 10 V desde cero hasta −10 V. Esto mantiene el voltaje en el capacitor a 10 V durante el instante del flanco descendente.

En este momento el capacitor comienza a descargarse exponencialmente. Por consiguiente, el voltaje en el resistor se va de −10 V a cero en una curva exponencial, como se indica mediante la línea de puntos en la figura 20-22(d).

Respuesta durante el pulso cuando $t_W < 5\tau$ Cuando el ancho de pulso es menor que cinco constantes de tiempo ($t_W < 5\tau$), el capacitor no tiene tiempo para descargarse por completo. Su carga parcial depende de la relación de la constante de tiempo y del ancho de pulso.

Como el capacitor no alcanza por completo los +10 V, el voltaje en el resistor no llegará a cero volts hacia el final del pulso. Por ejemplo, si el capacitor se carga a +5 V durante el intervalo del pulso, el voltaje en el resistor se reducirá a +5 V, como ilustra la figura 20-22(e).

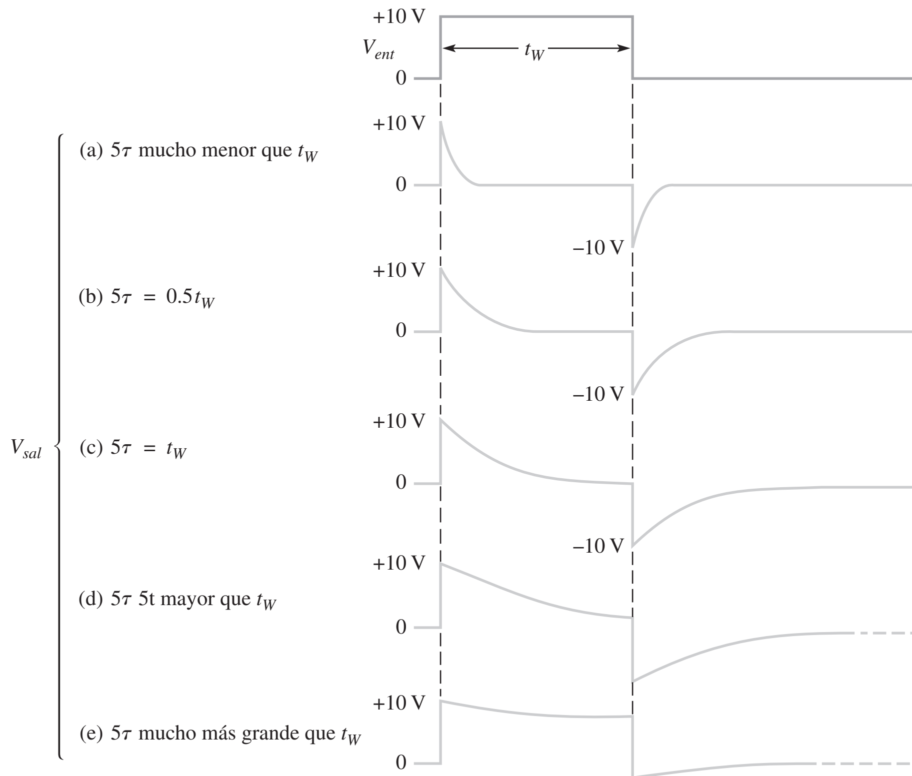
Respuesta al flanco descendente cuando $t_W < 5\tau$ A continuación, se examina el caso en que el capacitor está cargado sólo parcialmente al final del pulso ($t_W < 5\tau$). Por ejemplo, si el capacitor se carga a +5 V, el voltaje en el resistor en el instante antes del flanco descendente también es de +5 V porque el voltaje en el capacitor más el voltaje en el resistor deben sumar +10 V, como se ilustra en la figura 20-22(e).

Cuando ocurre el flanco descendente, el punto *A* pasa de +10 V a cero. Por consiguiente, el punto *B* pasa de +5 V a −5 V, como ilustra la figura 20-22(f). Esta reducción tiene lugar, desde luego, porque el voltaje en el capacitor no puede cambiar en el instante del flanco descendente. Inmediatamente después del flanco descendente, el capacitor comienza a descargarse hasta cero. Así, el voltaje en el resistor pasa de −5 V a cero, como se muestra.

Resumen de la respuesta de un diferenciador *RC* a un solo pulso

Una buena forma de resumir esta sección es dando un vistazo a las formas de onda generales de salida de un diferenciador conforme la constante de tiempo varía desde un extremo, cuando 5τ es mucho menor que el ancho de pulso, hasta el otro extremo, cuando 5τ es mucho más grande que el ancho de pulso. Estas situaciones se ilustran en la figura 20-23. En la parte (a) de esta figura, la salida consiste en transitorios positivos y negativos "abruptos" angostos. En la parte (e), la salida se aproxima a la forma de la entrada. En las partes (b), (c) y (d) se ilustran varias condiciones localizadas entre estos extremos.

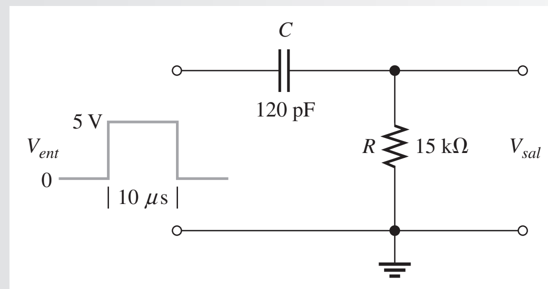
Es posible que se observe un pulso similar al de la figura 20-23(e) cuando se acopla con ca un pulso a un osciloscopio. En este caso el capacitor en el circuito de acoplamiento del osciloscopio puede actuar como un circuito diferenciador indeseable, lo cual propicia que el pulso decaiga. Para evitar esto, se puede acoplar con cd el osciloscopio y comprobar la compensación en el terminal de prueba.



▲ **FIGURA 20–23**

Efectos de un cambio de constante en la forma del voltaje de salida de un diferenciador *RC*.

EJEMPLO 20–4 Trace el voltaje de salida para el diferenciador de la figura 20-24.



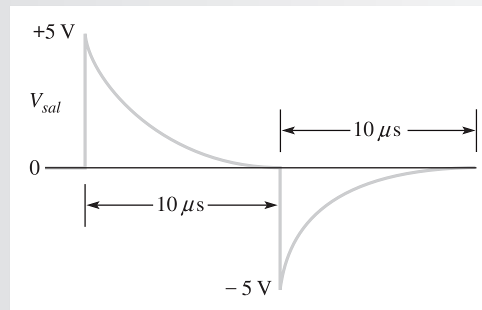
▲ **FIGURA 20–24**

Solución Primero, calcule la constante de tiempo.

$$\tau = RC = (15\,\text{k}\Omega)(120\,\text{pF}) = 1.8\,\mu\text{s}$$

En este caso, $t_W > 5\tau$, por lo que el capacitor alcanza su carga completa antes del final del pulso.

En el flanco ascendente, el voltaje en el resistor salta a +5 V y luego se reduce exponencialmente hasta cero hacia el final del ciclo. En el flanco descendente, el voltaje en el resistor salta a –5 V y luego vuelve a cero exponencialmente. El voltaje en el resistor es, desde luego, la salida, y su forma se muestra en la figura 20-25.



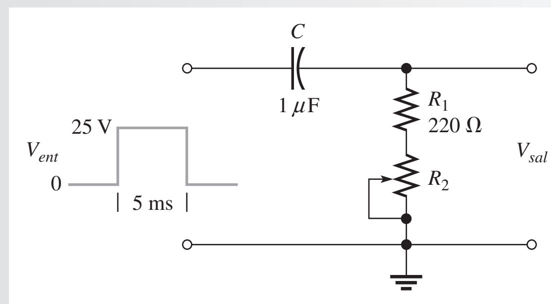
▲ FIGURA 20–25

Problema relacionado Trace el voltaje de salida si C cambia a 12 pF en la figura 20-24.



Use el archivo Multisim E20-04 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su respuesta en el problema relacionado. Para simular un pulso único, especifique una forma de onda con el ancho de pulso dado pero en ciclo pequeño de trabajo (periodo largo).

EJEMPLO 20–5 Determine la forma de onda del voltaje de salida para el diferenciador de la figura 20-26 con el reóstato ajustado de tal forma que la resistencia total de R_1 y R_2 sea de 2 kΩ.



▲ FIGURA 20–26

Solución En primer lugar, calcule la constante de tiempo.

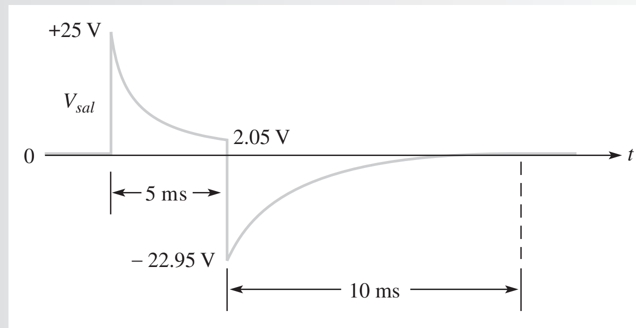
$$\tau = R_{tot}C = (2\,\text{k}\Omega)(1\,\mu\text{F}) = 2\,\text{ms}$$

En el flanco ascendente, el voltaje en el resistor salta de inmediato a +25 V. Como el ancho de pulso es de 5 ms, el capacitor se carga durante 2.5 constantes de tiempo y entonces no se carga por completo. Por tanto, se debe utilizar la fórmula para encontrar una exponencial reducida y calcular hasta qué voltaje disminuye la salida hacia el final del pulso.

$$v_{sal} = V_i e^{-t/RC} = 25e^{-5\text{ms}/2\text{ms}} = 25(0.082) = 2.05\text{ V}$$

donde $V_i = 25$ V y $t = 5$ ms. Este cálculo da el voltaje en el resistor (v_{sal}) al final del intervalo del ancho de pulso de 5 ms.

En el flanco descendente, el voltaje resonante salta de inmediato desde +2.05 V hasta −22.95 V (una transición de 25 V). La forma de onda resultante del voltaje de salida se muestra en la figura 20-27.



▲ FIGURA 20–27

Problema relacionado En la figura 20-26, determine el voltaje al final del pulso si el reóstato se ajusta de modo que la resistencia total sea de 1.5 kΩ.



Use el archivo Multisim E20-05 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado. Para simular un solo pulso, especifique una forma de onda con el ancho de pulso dado pero empleando un ciclo pequeño de trabajo.

REPASO DE LA SECCIÓN 20-4

1. Trace la salida de un diferenciador para un pulso de entrada de 10 V cuando $5\tau = 0.5t_W$.
2. ¿Bajo qué condición la forma del pulso de salida se parece más al pulso de entrada para un diferenciador?
3. ¿Qué apariencia tiene la salida de un diferenciador cuando 5τ es mucho menor que el ancho de pulso de la entrada?
4. Si en un circuito diferenciador el voltaje en el resistor se reduce a +5 V al final de un pulso de entrada de 15 V, ¿a qué valor negativo se irá el voltaje en el resistor en respuesta al flanco descendente de la entrada?

20–5 RESPUESTA DE DIFERENCIADORES *RC* A PULSOS REPETITIVOS

La respuesta de un diferenciador *RC* a un solo pulso, analizada en la pasada sección, se amplía en esta parte a pulsos repetitivos.

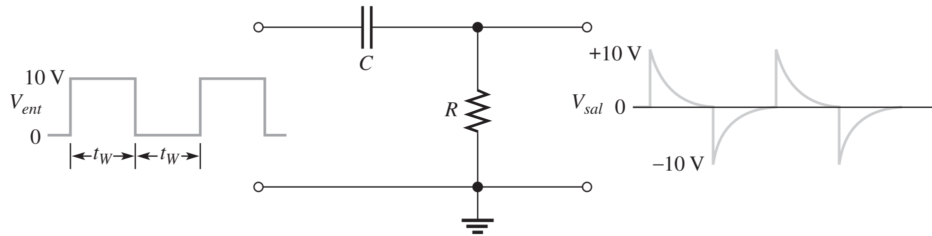
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar un diferenciador *RC* con pulsos de entrada repetitivos**
  - Determinar la respuesta cuando el ancho de pulso es menor que cinco constantes de tiempo

Si se aplica una forma de onda de pulso periódico a un circuito diferenciador *RC*, de nuevo son posibles dos condiciones: $t_W \geq 5\tau$ o $t_W < 5\tau$. La figura 20-28 muestra la salida cuando $t_W = 5\tau$. Conforme la constante de tiempo se reduce, tanto la parte positiva como la negativa de la salida se angostan. Advierta que el valor promedio de la salida es de cero. Un valor promedio de cero significa que la forma de onda tiene partes positivas y negativas iguales. El valor promedio de una forma de onda es su **componente de cd**. Como un capacitor bloquea la cd, impide que el componente de cd de la entrada pase a través de la salida, y el resultado es un valor promedio de cero.

▶ FIGURA 20–28

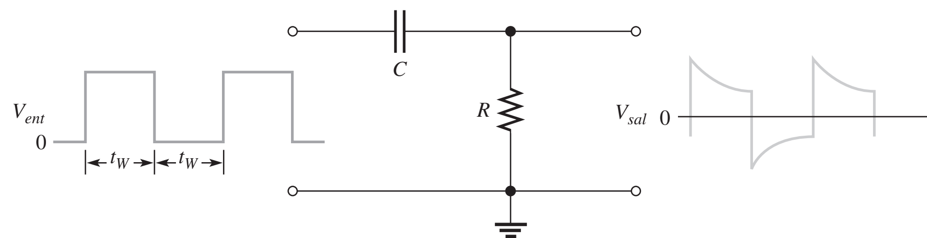
Ejemplo de respuesta de un diferenciador cuando $t_W = 5\tau$.



La figura 20-29 muestra la salida en estado permanente cuando $t_W < 5\tau$. Conforme la constante de tiempo se incrementa, las partes inclinadas positiva y negativamente se aplanan. Para una constante de tiempo muy larga, la salida se aproxima a la forma de la entrada, pero con un valor promedio de cero.

▶ FIGURA 20–29

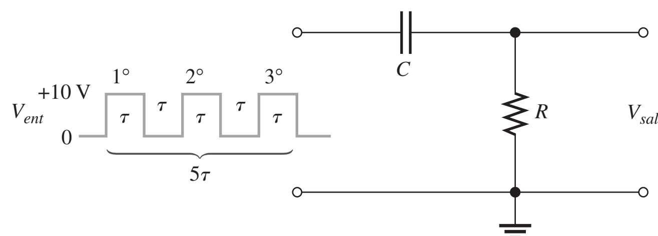
Ejemplo de respuesta de un diferenciador cuando $t_W < 5\tau$.



Análisis de una forma de onda repetitiva

Al igual que en el integrador, la salida del diferenciador requiere de tiempo (5τ) para alcanzar el estado permanente. Para ilustrar la respuesta, consideremos un ejemplo en el cual la constante de tiempo es igual al ancho del pulso de entrada. En este momento, no importa el valor de la constante de tiempo porque se sabe que el voltaje en el resistor disminuirá hasta aproximadamente un 37% de su valor máximo durante un pulso (1τ).

Suponga que el capacitor de la figura 20-30 inicialmente comienza descargado y luego examine el voltaje de salida sobre una base de pulso a pulso. Los resultados del análisis siguiente se muestran en la figura 20-31.

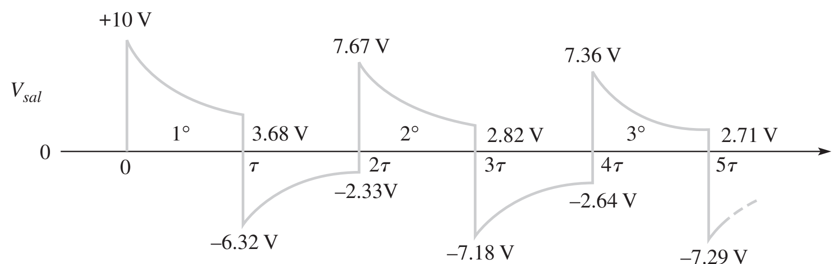


▲ FIGURA 20–30

Diferenciador RC con $\tau = t_W$.

▶ FIGURA 20–31

Forma de onda de salida de un diferenciador durante un tiempo transitorio para el circuito de la figura 20-30.



Primer pulso En el flanco ascendente, la salida salta al instante a +10 V. En seguida el capacitor se carga parcialmente al 63.2% de 10 V, que son 6.32 V. Por tanto, el voltaje de salida debe disminuir a 3.68 V, como indica la figura 20-31. En el flanco descendente, la salida realiza al instante una transición de 10 V hacia negativo a −6.32 V (−10 V + 3.68 V = −6.32 V).

Entre los pulsos primero y segundo El capacitor se descarga al 36.8% de 6.32 V, que son 2.33 V. Así, el voltaje en el resistor, que inicia en −6.32 V, debe incrementarse hasta −2.33 V. ¿Por qué? Porque en el instante previo al siguiente pulso, el voltaje de entrada es de cero. Entonces, la suma de v_C y v_R debe ser cero (2.33 V – 2.33 V = 0). Recuerde que $v_C + v_R = v_{ent}$ en todo momento, de acuerdo con la ley del voltaje de Kirchhoff.

Segundo pulso En el flanco ascendente, la salida realiza una transición instantánea de 10 V hacia positivo desde −2.33 V hasta 7.67 V. Luego, hacia el final del pulso, el capacitor se carga a 0.632 × (10 V – 2.33 V) = 4.85 V. Así, el voltaje en el capacitor se incrementa desde 2.33 V hasta 2.33 V + 4.85 V = 7.18 V. El voltaje de salida se reduce a 0.368 × 7.67 V = 2.82 V.

En el flanco descendente, la salida realiza de modo instantáneo una transición hacia negativo desde 2.82 V hasta −7.18 V, como se muestra en la figura 20-31.

Entre los pulsos segundo y tercero El capacitor se descarga al 36.8% de 7.18 V, que son 2.64 V. Por tanto, el voltaje de salida se inicia en −7.18 V y se incrementa hasta −2.64 V, porque el voltaje en el capacitor y el voltaje en el resistor deben sumar cero en el instante previo al tercer pulso (la entrada es cero).

Tercer pulso En el flanco ascendente, la salida realiza una transición instantánea de 10 V desde −2.64 V hasta +7.36 V. En seguida, el capacitor se carga a 0.632 × (10 V – 2.64 V) = 4.65 V hasta 2.64 V + 4.65 V = 7.29 V. Por consiguiente, el voltaje de salida se reduce a 0.368 × 7.36 V = 2.71 V. En el flanco descendente, la salida se reduce instantáneamente desde +2.71 V hasta –7.29 V.

Después del tercer pulso han transcurrido cinco constantes de tiempo, y el voltaje de salida se aproxima a su estado permanente. Por tanto, continuará variando desde un máximo positivo de unos +7.3 V hasta un máximo negativo de aproximadamente –7.3 V, con un valor promedio de cero.

REPASO DE LA SECCIÓN 20-5

1. ¿Qué condiciones permiten que un diferenciador *RC* se cargue y descargue por completo cuando se aplica una forma de onda de pulso periódico a la entrada?
2. ¿Qué apariencia tendrá la forma de onda de salida si la constante de tiempo es extremadamente corta comparada con el ancho de pulso de una entrada de onda cuadrada?
3. ¿A qué es igual el valor promedio del voltaje de salida del diferenciador durante el estado permanente?

20–6 RESPUESTA DE INTEGRADORES *RL* A ENTRADAS DE PULSOS

Un circuito *RL* dispuesto en serie en el cual el voltaje de salida se toma entre los extremos del resistor se conoce como integrador en términos de la respuesta en función del tiempo. Aunque sólo se analiza la respuesta a un solo pulso, es posible ampliar el análisis hasta pulsos negativos, tal como se describió para el integrador *RC*.

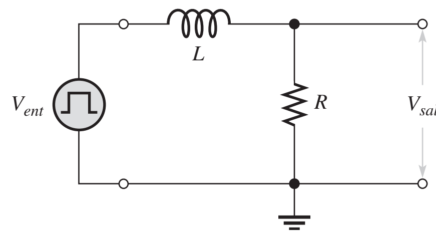
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar la operación de un integrador *RL***
  - Determinar la respuesta a un solo pulso de entrada

La figura 20-32 muestra un integrador *RL*. La forma de onda de salida se toma a través del resistor y, en condiciones equivalentes, es igual a la del integrador *RC*. Recordemos que en el caso *RC*, la salida fue a través del capacitor.

▶ **FIGURA 20–32**

Integrador *RL* con un generador de pulsos conectado.

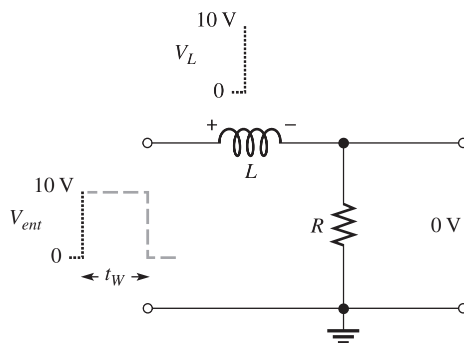


Como se sabe, cada borde de un pulso ideal se considera instantáneo. Dos reglas básicas para el comportamiento del inductor nos ayudarán a analizar las respuestas de circuitos *RL* a entradas de pulsos.

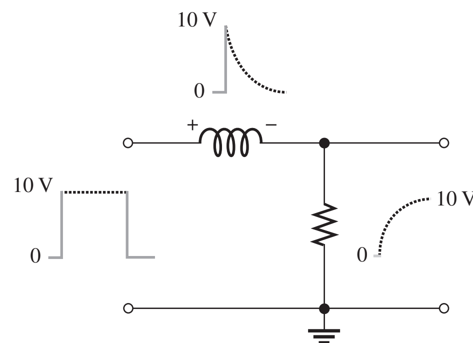
1. El inductor aparece como un circuito abierto ante un cambio instantáneo de corriente y como un corto circuito (idealmente) ante cd.
2. La corriente en un inductor no puede cambiar instantáneamente, sólo puede hacerlo exponencialmente.

Respuesta del integrador *RL* a un solo pulso

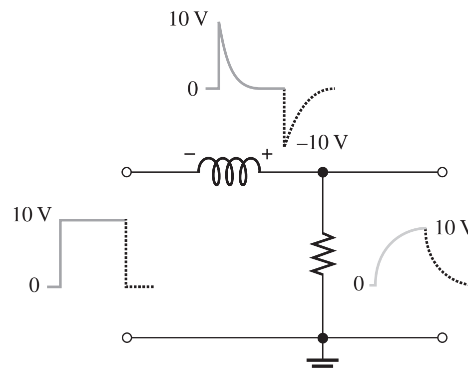
Cuando se conecta un generador de pulsos a la entrada del integrador y el pulso de voltaje pasa de su nivel bajo a su nivel alto, el inductor impide el cambio abrupto de corriente. En consecuencia, el inductor actúa como un circuito abierto, y todo el voltaje de entrada aparece a través de él en el instante del flanco de pulso ascendente. Esta situación se ilustra en la figura 20-33(a).



(a) En el flanco ascendente del pulso ($i = 0$)



(b) Durante la parte plana del pulso



(c) En el flanco descendente del pulso y después

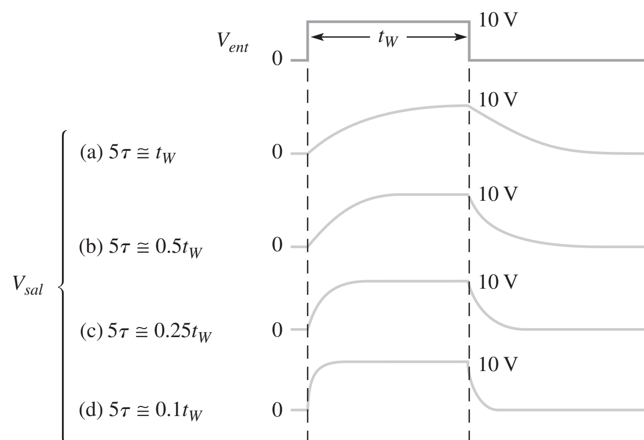
▲ **FIGURA 20–33**

Ilustración de la respuesta a un pulso de un integrador *RL* ($t_W > 5\tau$).

Después del flanco ascendente la corriente se incrementa, y el voltaje de salida sigue a la corriente conforme se incrementa exponencialmente, como indica la figura 20-33(b). La corriente puede alcanzar un máximo de V_p/R si el tiempo transitorio es más corto que el ancho de pulso ($V_p = 10$ V en este ejemplo).

Cuando el pulso pasa de su nivel alto a su nivel bajo, se crea un voltaje inducido de polaridad inversa a través de la bobina en un esfuerzo por mantener la corriente igual a V_P/R. El voltaje de salida comienza a disminuir exponencialmente, como indica la figura 20-33(c).

La forma exacta de la salida depende de la constante de tiempo *L*/*R* como se resume en la figura 20-34 para diversas relaciones entre la constante de tiempo y el ancho de pulso. Observe que la respuesta de este circuito *RL* en función de la forma de la salida es idéntica a la del integrador *RC*. La relación de la constante de tiempo *L*/*R* al ancho del pulso de entrada tiene el mismo efecto que la constante de tiempo *RC* mostrada en la figura 20-4. Por ejemplo, cuando $t_W < 5\tau$, el voltaje de salida no alcanzará su valor máximo posible.

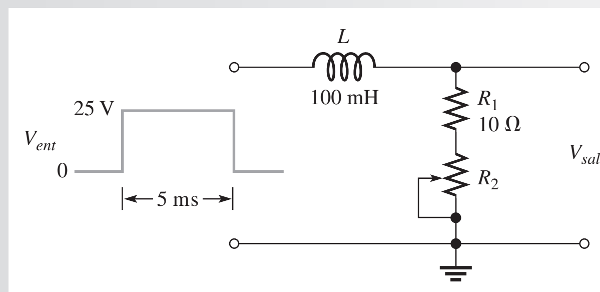


◀ **FIGURA 20–34**

Ilustración de la variación en la forma del pulso de salida de un integrador *RL* con la constante de tiempo.

EJEMPLO 20–6 Determine el voltaje de salida máximo para el integrador *RL* de la figura 20-35 cuando se aplica un solo pulso como se muestra. El reóstato está ajustado de modo que la resistencia total sea de 50 Ω.

▶ **FIGURA 20–35**



Solución Calcule la constante de tiempo.

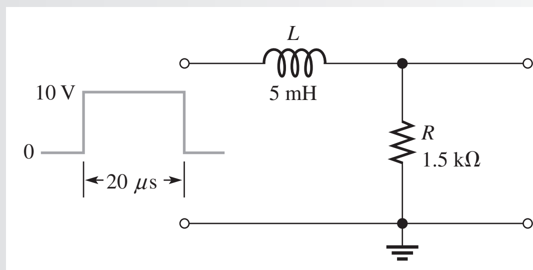
$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{100\text{ mH}}{50\ \Omega} = 2\text{ ms}$$

Como el ancho de pulso es de 5 ms, el inductor se carga durante 2.5τ. Use la fórmula exponencial para calcular el voltaje.

$$v_{sal(máx)} = V_F(1 - e^{-t/\tau}) = 25(1 - e^{-5\text{ms}/2\text{ms}})$$
$$= 25(1 - e^{-2.5}) = 25(1 - 0.082) = 25(0.918) = \mathbf{22.9\ V}$$

Problema relacionado ¿A qué resistencia se debe ajustar el reóstato, R_2, para que el voltaje de salida alcance 25 V al final del pulso en la figura 20-35?

EJEMPLO 20–7 Se aplica un pulso al integrador *RL* de la figura 20-36. Determine las formas de onda completas y los valores de I, V_R y V_L.



▲ **FIGURA 20–36**

Solución La constante de tiempo del circuito es

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5\text{ mH}}{1.5\text{ k}\Omega} = 3.33\ \mu\text{s}$$

Como $5\tau = 16.7\ \mu$s resulta menor que t_W, la corriente alcanzará su valor máximo y permanecerá allí hasta el final del pulso.

En el flanco ascendente del pulso,

$$i = 0\text{ A}$$
$$v_R = 0\text{ V}$$
$$v_L = 10\text{ V}$$

El inductor aparece inicialmente como una abertura, por lo que todo el voltaje de entrada aparece entre las terminales de *L*.

Durante el pulso,

$$i \text{ se incrementa exponencialmente a } \frac{V_p}{R} = \frac{10\text{ V}}{1.5\text{ k}\Omega} = 6.67\text{ mA en } 16.7\ \mu\text{s}$$

v_R se incrementa exponencialmente a 10 V en 16.7 μs

v_L se reduce exponencialmente a cero en 16.7 μs

En el flanco descendente del pulso,

$$i = 6.67\text{ mA}$$
$$v_R = 10\text{ V}$$
$$v_L = -10\text{ V}$$

Después del pulso,

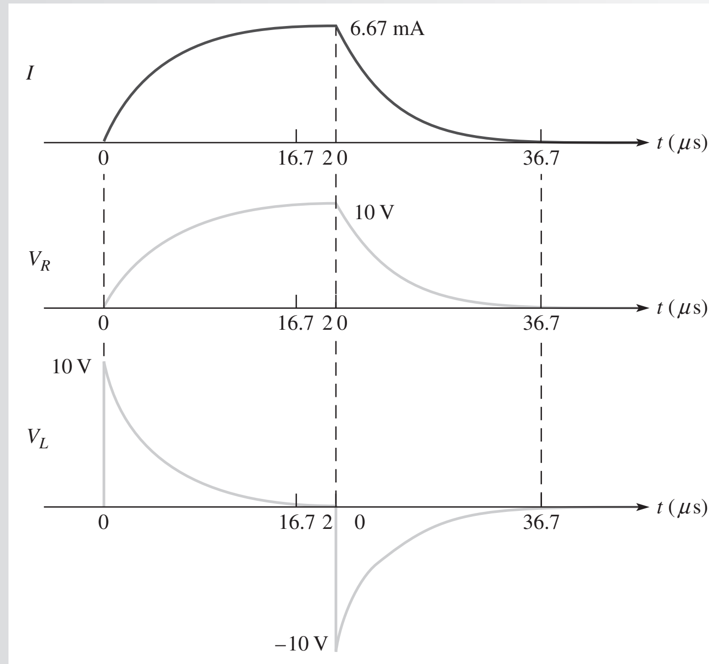
i se reduce exponencialmente a cero en 16.7 μs

v_R se reduce exponencialmente a cero en 16.7 μs

v_L se incrementa exponencialmente a cero en 16.7 μs

Las formas de onda se muestran en la figura 20-37.

▶ **FIGURA 20–37**

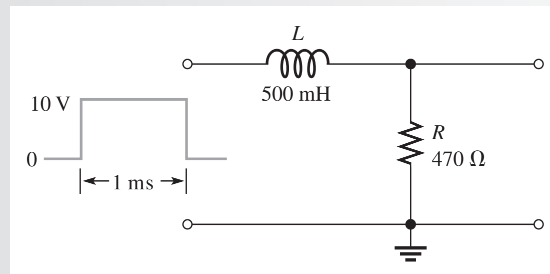


Problema relacionado ¿Cuál será el voltaje de salida máximo si la amplitud del pulso de entrada se incrementa a 20 V en la figura 20-36?



Use el archivo Multisim E20-07 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado. Para simular un solo pulso, especifique una forma de onda con el ancho de pulso dado pero empleando un ciclo pequeño de trabajo.

EJEMPLO 20–8 Se aplica un pulso de 10 V con ancho de 1 ms al integrador *RL* mostrado en la figura 20-38. Determine el nivel de voltaje que la salida alcanzará durante el pulso. Si la resistencia interna de la fuente es de 30 Ω, ¿en cuánto tiempo se reducirá la salida a cero? Trace la forma de onda del voltaje de salida.



▲ **FIGURA 20–38**

Solución El inductor se carga por conducto de la resistencia de la fuente de 30 Ω más el resistor externo de 470 Ω. La constante de tiempo es

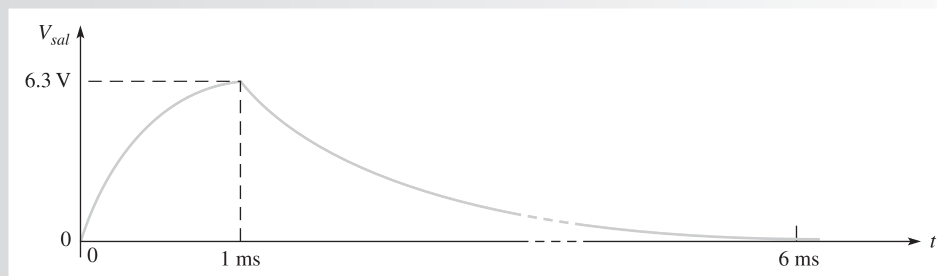
$$\tau = \frac{L}{R_{tot}} = \frac{500\text{ mH}}{470\ \Omega + 30\ \Omega} = \frac{500\text{ mH}}{500\ \Omega} = 1\text{ ms}$$

Advierta que en este caso el ancho de pulso es exactamente igual a τ. Por tanto, el V_R de salida alcanzará aproximadamente el 63% de la amplitud de entrada total en 1τ. Así, el voltaje de salida llega a **6.3 V** al final del pulso.

Después de que desaparece el pulso, el inductor se descarga a través de la resistencia de la fuente de 30 Ω y del resistor de 470 Ω. El voltaje de salida requiere de **5τ** para reducirse por completo a cero.

$$5\tau = 5(1 \text{ ms}) = 5 \text{ ms}$$

El voltaje de salida se muestra en la figura 20-39.



▲ FIGURA 20–39

Problema relacionado ¿A qué valor debe ser cambiado *R* para permitir que el voltaje de salida alcance el nivel de la entrada durante el pulso?



Use el archivo Multisim E20-08 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado. Para simular un solo pulso, especifique una forma de onda con el ancho de pulso dado pero con un ciclo pequeño de trabajo.

REPASO DE LA SECCIÓN 20-6

1. **En un integrador *RL*, ¿a través de qué componente se toma el voltaje de salida?**
2. **Cuando se aplica un pulso a un integrador *RL*, ¿qué condición debe existir para que el voltaje de salida alcance la amplitud de la entrada?**
3. **¿Bajo qué condición el voltaje de salida tendrá la forma aproximada del pulso de entrada?**

20–7 RESPUESTA DE DIFERENCIADORES *RL* A ENTRADAS DE PULSOS

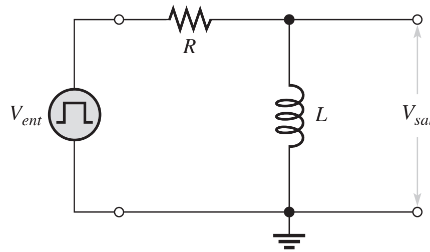
Un circuito *RL* dispuesto en serie en el cual el voltaje de salida se toma a través del inductor se conoce como diferenciador en términos de la respuesta en función del tiempo. Aunque sólo se analiza la respuesta a un solo pulso, es posible ampliar el análisis a pulsos repetitivos, tal como fue descrito para el diferenciador *RC*.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar la operación de un diferenciador *RL***
  - Determinar la respuesta a un solo pulso de entrada

Respuesta del diferenciador *RL* a un solo pulso

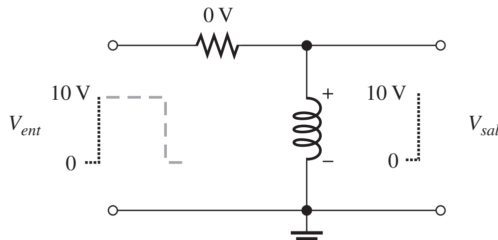
La figura 20-40 muestra un diferenciador *RL* con un generador de pulsos conectado a la entrada.



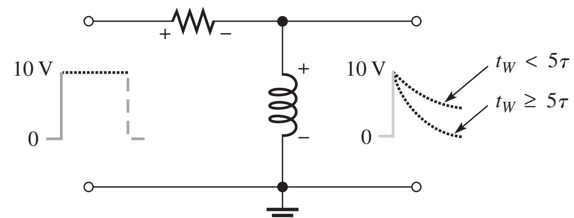
◄ **FIGURA 20–40**

Diferenciador *RL* con un generador de pulsos conectado.

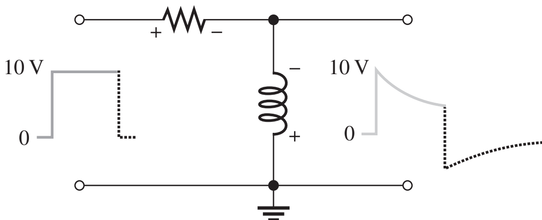
Al principio, antes del pulso, no hay corriente en el circuito. Cuando el pulso de entrada pasa de su nivel bajo a su nivel alto, el inductor evita el cambio abrupto de corriente. Lo hace, como se sabe, con un voltaje inducido que es igual y opuesto a la entrada. Por consiguiente, *L* parece una abertura y todo el voltaje de entrada aparece entre sus terminales en el instante del flanco ascendente, como se muestra en la figura 20-41(a) con un pulso de 10 V.



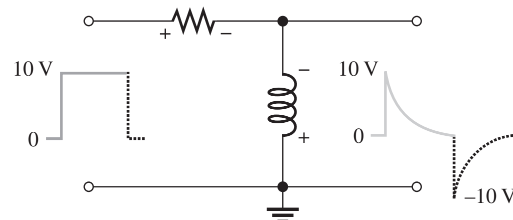
(a) En el flanco ascendente del pulso



(b) Durante la parte plana del pulso



(c) En el flanco descendente cuando $t_W < 5\tau$



(d) En el flanco descendente cuando $t_W \geq 5\tau$

▲ **FIGURA 20–41**

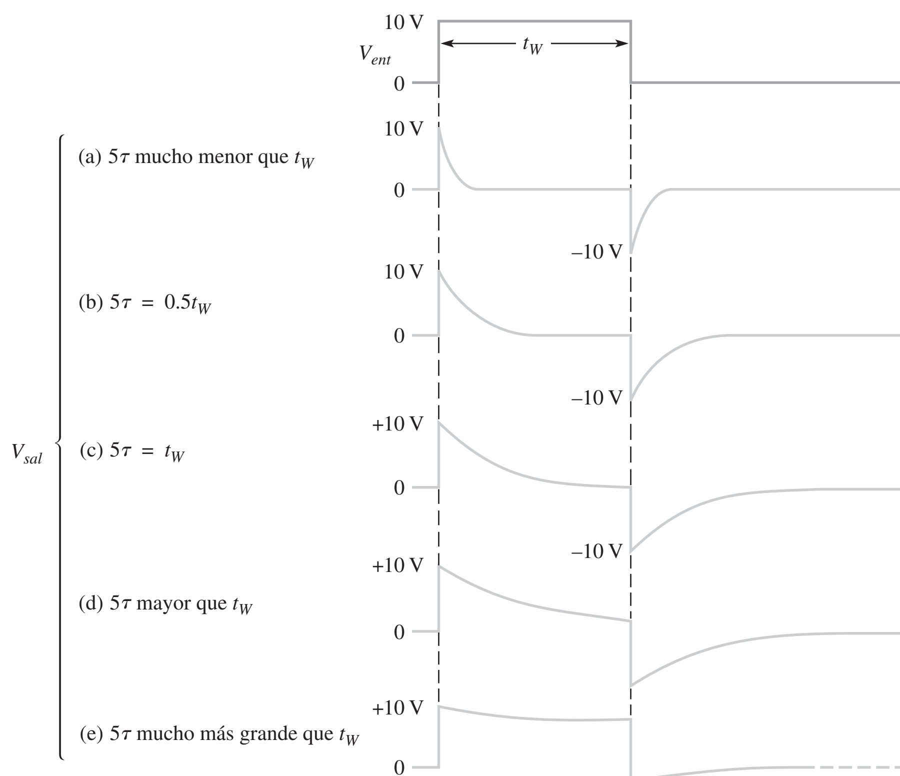
lustración de la respuesta de un diferenciador *RL* en ambas condiciones de constante de tiempo.

Durante el pulso, la corriente se incrementa exponencialmente. Así, el voltaje en el inductor se reduce, figura 20-41(b). El ritmo de reducción, como se sabe, depende de la constante de tiempo *L*/*R*. Cuando ocurre el borde descendente de la entrada, el inductor reacciona para mantener la corriente como está, creando un voltaje inducido en una dirección como indica la figura 20-41(c). Esta reacción aparece en forma de transición repentina hacia negativo del voltaje del inductor, según muestran las figuras 20-41(c) y (d).

Es posible esperar dos condiciones, tal como indican las figuras 20-41(c) y (d). En la parte (c), 5τ es mayor que el ancho del pulso de entrada, y el voltaje de salida no tiene tiempo de reducirse a cero. En la parte (d), 5τ es menor o igual al ancho de pulso, y por tanto la salida se reduce a cero antes del final del pulso. En este caso ocurre una transición de –10 V en el flanco de salida.

Tenga en cuenta que por lo concerniente a las formas de onda de salida y entrada, el integrador y el diferenciador *RL* funcionan igual que sus contrapartes *RC*.

En la figura 20-42 se muestra un resumen de la respuesta de un diferenciador *RL* para relaciones de diversas constantes de tiempo y anchos de pulso.

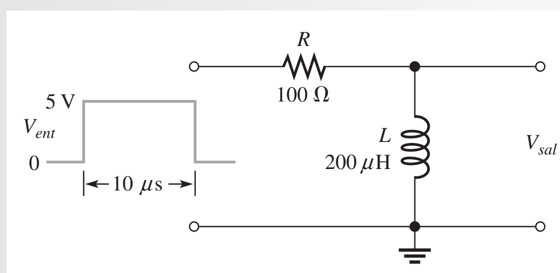


▶ **FIGURA 20–42**

Ilustración de la variación de la forma del pulso de salida con la constante de tiempo *RL*.

EJEMPLO 20–9 Trace el voltaje de salida para el diferenciador *RL* de la figura 20-43.

▶ **FIGURA 20–43**



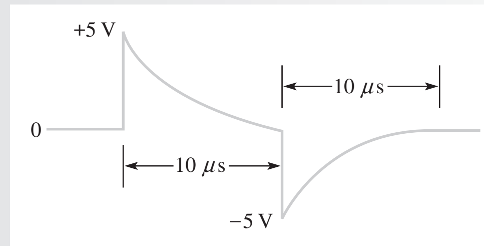
Solución Primero, calcule la constante de tiempo.

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{200\ \mu\text{H}}{100\ \Omega} = 2\ \mu\text{s}$$

En este caso, $t_W = 5\tau$, de modo que la salida se reducirá a cero al final del pulso.

En el flanco ascendente, el voltaje a través del inductor salta a +5 V y luego se reduce exponencialmente a cero. Llega aproximadamente a cero en el instante del flanco descendente. En el flanco descendente de la entrada, el voltaje a través del inductor salta hasta –5 V y luego regresa a cero. La forma de onda de salida se muestra en la figura 20-44.

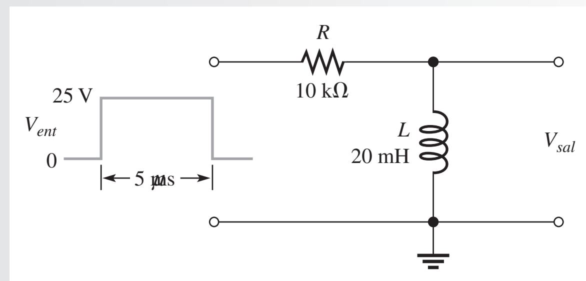
▶ **FIGURA 20–44**



Problema relacionado Trace el voltaje de salida si el ancho de pulso se reduce a 5 μs en la figura 20-43.

EJEMPLO 20–10 Determine la forma de onda del voltaje de salida para el diferenciador de la figura 20-45.

▶ **FIGURA 20–45**



Solución Primero, calcule la constante de tiempo.

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20\text{ mH}}{10\text{ k}\Omega} = 2\ \mu\text{s}$$

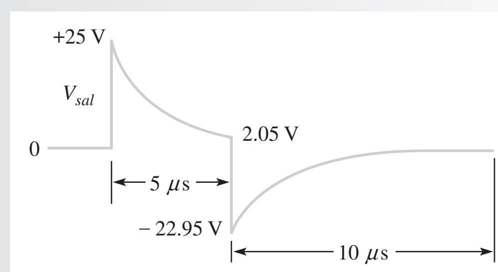
En el flanco ascendente, el voltaje a través del inductor salta de inmediato a +25 V. Como el ancho de pulso es de 5 μs, el voltaje se carga sólo durante 2.5τ, de modo que se debe utilizar la fórmula para una exponencial decreciente.

$$v_L = V_i e^{-t/\tau} = 25e^{-5\mu\text{s}/2\mu\text{s}} = 25e^{-2.5} = 25(0.082) = 2.05\text{ V}$$

Este resultado es el voltaje entre las terminales del inductor al final del pulso de entrada de 5 μs.

En el flanco descendente, la salida salta de inmediato desde +2.05 V hasta –22.95 V (una transición de 25 V hacia negativo). La forma completa de onda de salida se muestra en la figura 20-46.

▶ **FIGURA 20–46**



Problema relacionado ¿Cuál debe ser el valor de *R* para que el voltaje de salida se reduzca a cero al final del pulso en la figura 20-45?



Use el archivo Multisim E20-10 para verificar los resultados calculados en este ejemplo y para confirmar su cálculo en el problema relacionado. Para simular un solo pulso, especifique una forma de onda con el ancho de pulso dado pero con un ciclo pequeño de trabajo.

REPASO DE LA SECCIÓN 20-7

1. **En un diferenciador *RL*, ¿a través de qué componente se toma el voltaje de salida?**
2. **¿Bajo qué condición el pulso de salida se parece más al pulso de entrada?**
3. **Si el voltaje entre las terminales del inductor en un diferenciador *RL* se reduce a +2 V al final de un pulso de entrada de +10 V, ¿a qué voltaje negativo se irá la salida en respuesta al flanco descendente de la entrada?**

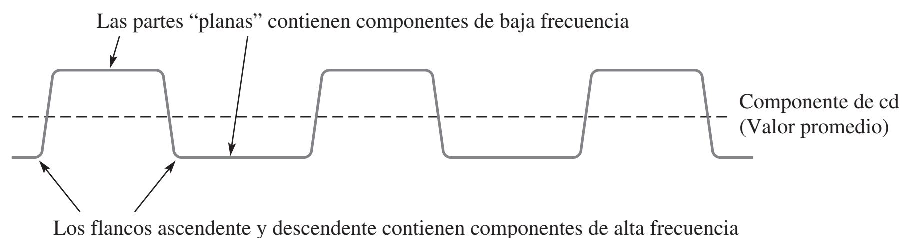
20–8 RELACIÓN DE LA RESPUESTA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A LA RESPUESTA A LA FRECUENCIA

Existe una relación definida entre la respuesta en función del tiempo (pulso) y la respuesta a la frecuencia. Los rápidos flancos ascendentes y descendentes de una forma de onda pulsante contienen los componentes de frecuencia más alta. Las partes planas de la forma de onda pulsante, que son las partes superiores y la línea de base de la forma de onda pulsante, representan cambios lentos o componentes de frecuencia más baja. El valor promedio de la forma de onda pulsante es su componente de cd.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Explicar la relación de la respuesta en función del tiempo a la respuesta a la frecuencia**
  - Describir una forma de onda pulsante en función de sus componentes de frecuencia
  - Explicar de qué manera actúan como filtros los integradores *RC* y *RL*
  - Explicar de qué manera actúan como filtros los diferenciadores *RC* y *RL*
  - Establecer las fórmulas que relacionan los tiempos de ascenso y descenso con la frecuencia

Las relaciones de características pulsantes y contenido de frecuencia de formas de onda pulsantes se indican en la figura 20-47.

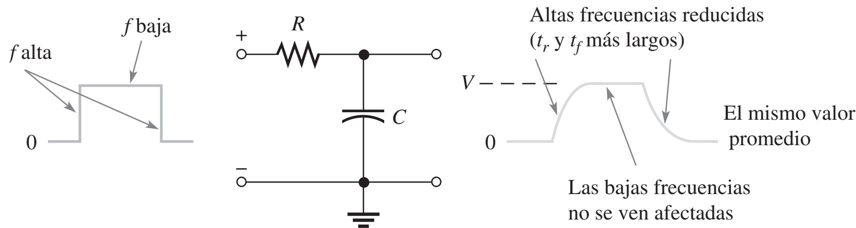


▲ **FIGURA 20–47**

Contenido de frecuencia de una forma de onda pulsante.

El integrador

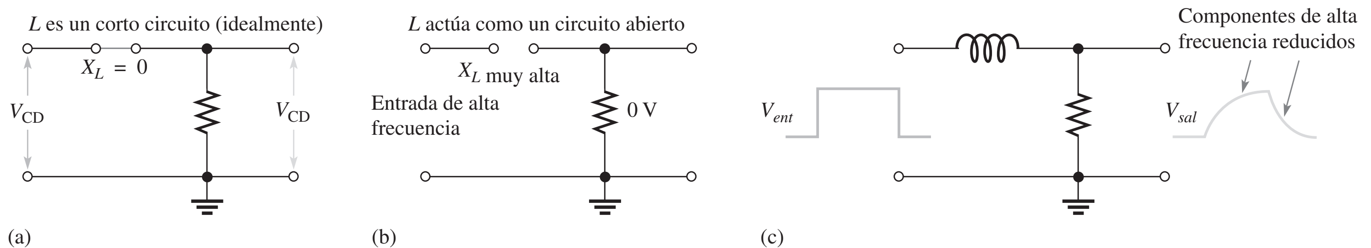
Integrador RC En términos de respuesta a la frecuencia, el integrador *RC* actúa como un filtro pasabajas. Como ya se sabe, el integrador *RC* tiende a redondear los flancos de los pulsos aplicados. Este redondeo ocurre en diversos grados, dependiendo de la relación de la constante de tiempo al ancho de pulso y al periodo. El redondeo de los flancos indica que el integrador tiende a reducir los componentes de alta frecuencia de la forma de onda del pulso, según ilustra la figura 20-48.



▲ **FIGURA 20–48**

Relación de respuesta en función del tiempo y respuesta a la frecuencia en un integrador *RC* (un pulso en una forma de onda repetitiva).

Integrador RL Al igual que el integrador *RC*, el integrador *RL* actúa como filtro pasabajas básico porque *L* está en serie entre la entrada y la salida. La reactancia inductiva, X_L, es pequeña a bajas frecuencias y ofrece poca oposición. Se incrementa con la frecuencia, por lo que a frecuencias altas la mayor parte del voltaje total disminuye entre las terminales de *L* y muy poco en *R*, la salida. Si la entrada es de cd, *L* actúa como un corto circuito ($X_L = 0$). A altas frecuencias, *L* actúa como un circuito abierto, según ilustra la figura 20-49.



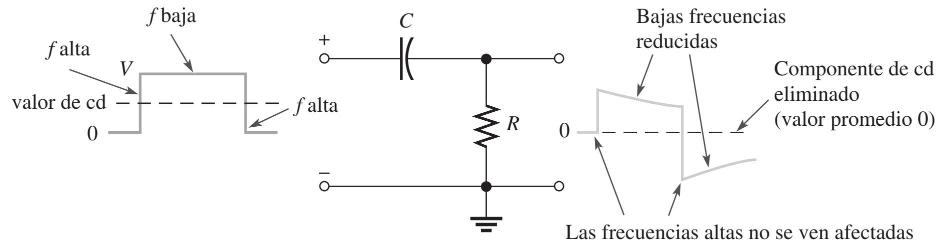
▲ **FIGURA 20–49**

Acción de filtro pasabajas.

El diferenciador

Diferenciador RC En función de la respuesta a la frecuencia, el diferenciador *RC* actúa como un filtro pasaaltas. Como se sabe, el diferenciador trata de inclinar la parte plana de un pulso. Esto es, tiende a reducir los componentes de baja frecuencia de una forma de onda pulsante. Asimismo, elimina por completo el componente de cd de la entrada y produce una salida de valor promedio igual a cero. Esta acción se ilustra en la figura 20-50.

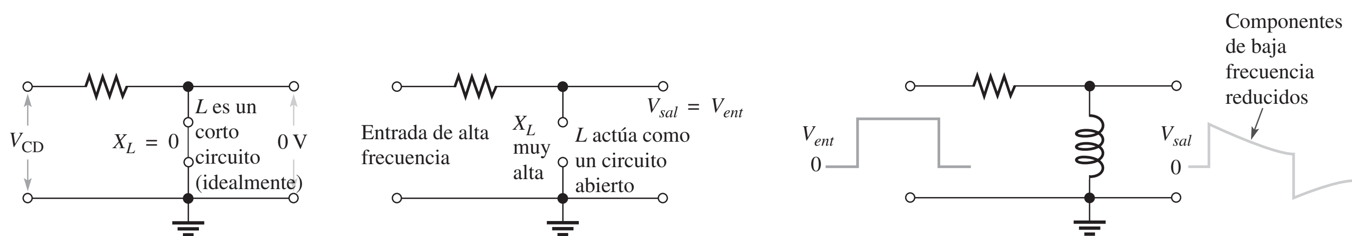
Diferenciador RL De nueva cuenta, al igual que el diferenciador *RC*, el diferenciador *RL* también actúa como un filtro pasaaltas básico. Debido a que *L* está conectado entre las terminales de



▶ **FIGURA 20–50**

Relación de respuesta en función del tiempo y respuesta a la frecuencia en un diferenciador *RC* (un pulso en una forma de onda repetitiva).

salida, se desarrolla menos voltaje en L a frecuencias bajas que a frecuencias altas. Hay cero volts a la salida para cd (omitiendo la resistencia de devanado). Para frecuencias altas, la mayor parte del voltaje de entrada disminuye entre las terminales de la bobina de salida ($X_L = 0$ para cd; $X_L \cong$ circuito abierto para frecuencias altas). La figura 20-51 muestra la acción de filtro pasaaltas.



▲ **FIGURA 20–51**

Acción de filtro pasaaltas.

Fórmulas que relacionan la respuesta en función del tiempo con la respuesta a la frecuencia

Las rápidas transiciones de un pulso (tiempo de subida, t_r, y tiempo de caída, t_f) están relacionadas con el componente de frecuencia más alta, f_h, contenido en dicho pulso mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 20–1

$$t_r = \frac{0.35}{f_h}$$

Esta fórmula también es válida para el tiempo de caída, y la transición más rápida determina la frecuencia más alta en la forma de onda pulsante.

La ecuación 20-1 puede ser reordenada para encontrar la frecuencia más alta como sigue:

Ecuación 20–2

$$f_h = \frac{0.35}{t_r}$$

también,

Ecuación 20–3

$$f_h = \frac{0.35}{t_f}$$

EJEMPLO 20–11 ¿Cuál es la frecuencia más alta contenida en un pulso cuyos tiempos de subida y caída son iguales a 10 nanosegundos (10 ns)?

Solución

$$f_h = \frac{0.35}{t_r} = \frac{0.35}{10 \times 10^{-9}\,\text{s}} = 0.035 \times 10^{9}\,\text{Hz}$$
$$= 35 \times 10^{6}\,\text{Hz} = \mathbf{35\,MHz}$$

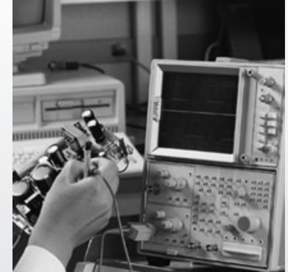
Problema relacionado ¿Cuál es la frecuencia más alta en un pulso con $t_r = 20$ ns y $t_f = 15$ ns?

REPASO DE LA SECCIÓN 20-8

1. ¿Qué tipo de filtro es un integrador?
2. ¿Qué tipo de filtro es un diferenciador?
3. ¿Cuál es el componente de frecuencia más alta en una forma de onda pulsante que tiene t_r y t_f iguales a 1 μs?

20–9 LOCALIZACIÓN DE FALLAS

En esta sección, se utilizan circuitos *RC* con entradas de pulsos para demostrar los efectos de las fallas de componentes comunes en casos seleccionados. Los conceptos pueden relacionarse luego fácilmente con circuitos *RL*.

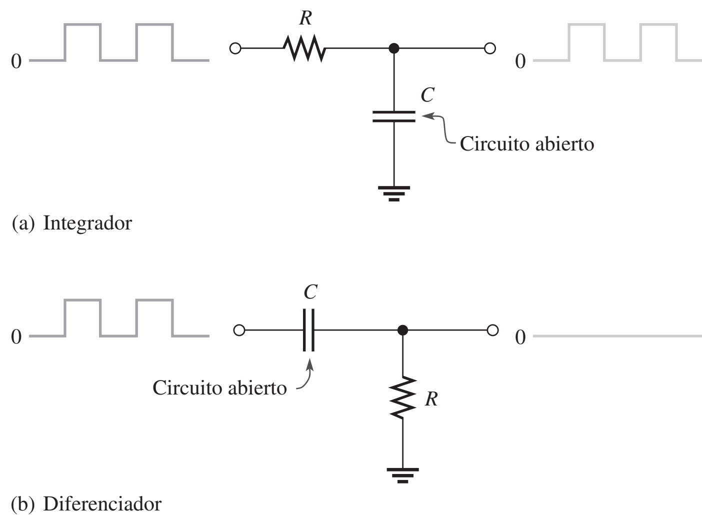


Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Localizar fallas en integradores *RC* y diferenciadores *RC***
  - Reconocer el efecto de un capacitor abierto
  - Reconocer el efecto de un capacitor con pérdidas
  - Reconocer el efecto de un capacitor en cortocircuito
  - Reconocer el efecto de un resistor abierto

Capacitor abierto

Si el capacitor de un integrador *RC* se abre, la salida tiene la misma forma de onda que la entrada, como indica la figura 20-52(a). Si el capacitor de un diferenciador se abre, la salida es de cero porque se mantiene a tierra a través del resistor, como ilustra la parte (b).

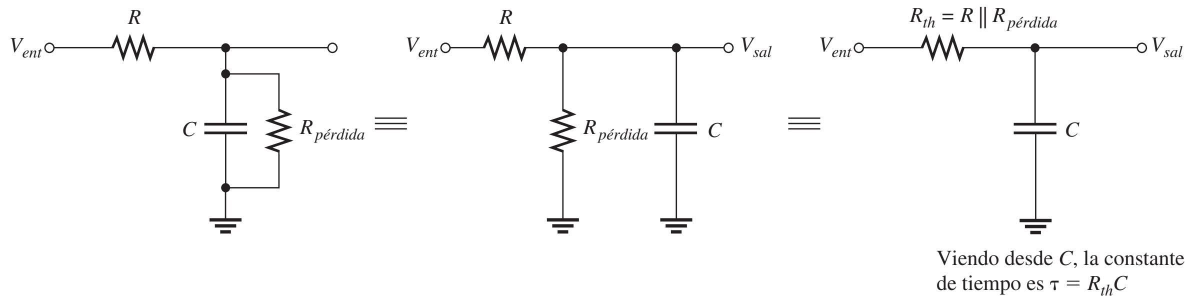


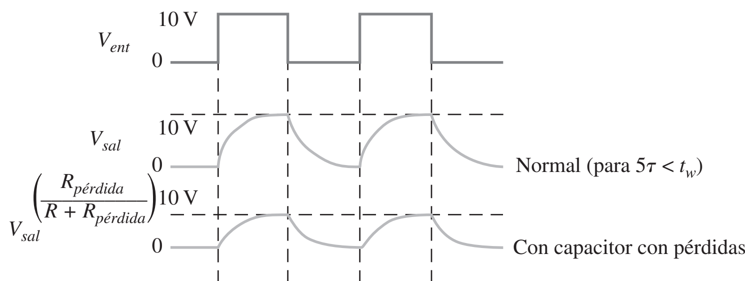
▲ FIGURA 20–52

Ejemplos del efecto de un capacitor abierto.

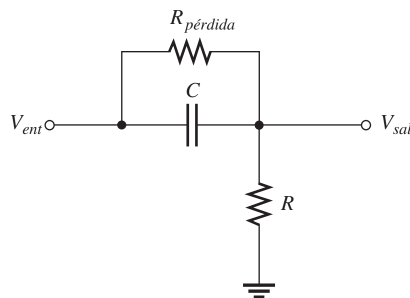
Capacitor con pérdidas

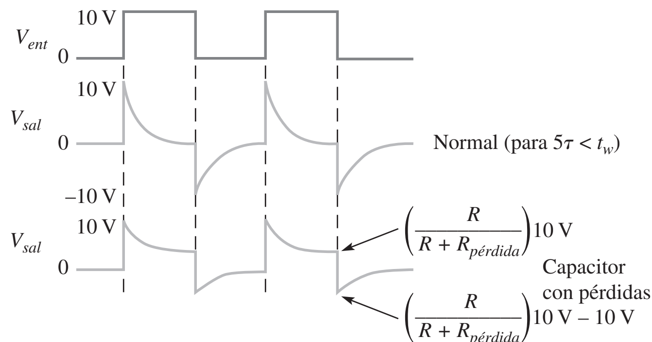
Si el capacitor de un integrador *RC* presenta pérdidas, suceden tres cosas: (a) la resistencia a las pérdidas reducirá efectivamente la constante de tiempo (cuando se obtiene el equivalente de Thevenin, visto desde *C* aparece en paralelo con *R*); (b) la forma de onda del voltaje de salida (a través de *C*) siempre es alterada con respecto a su condición normal por un tiempo de carga más corto; y (c) la amplitud de la salida se reduce porque *R* y $R_{pérdida}$ actúan efectivamente como un divisor de voltaje. Estos efectos se ilustran en la figura 20-53(a).





(a)





(b)

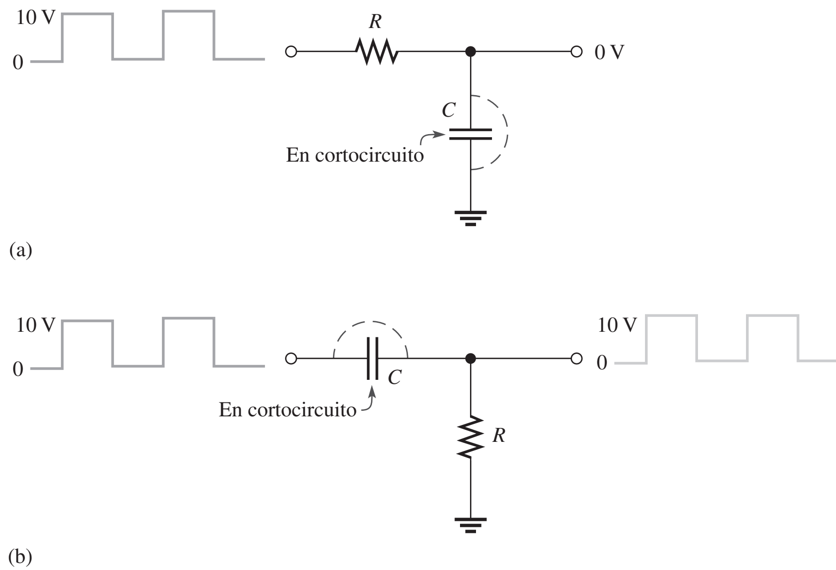
▲ **FIGURA 20–53**

Ejemplos del efecto de un capacitor con pérdidas.

Si el capacitor de un diferenciador presenta pérdidas, la constante de tiempo se reduce, exactamente como en el integrador (ambos son simplemente circuitos *RC* en serie). Cuando el capacitor alcanza su carga completa, la acción efectiva de divisor de voltaje de *R* y $R_{pérdida}$ ajusta el voltaje de salida (a través de *R*), figura 20-53(b).

Capacitor en cortocircuito

Si el capacitor de un integrador *RC* se pone en cortocircuito, la salida es a tierra, como indica la figura 20-54(a). Si el capacitor de un diferenciador *RC* se pone en cortocircuito, la salida es la misma que la entrada, según muestra la parte (b).

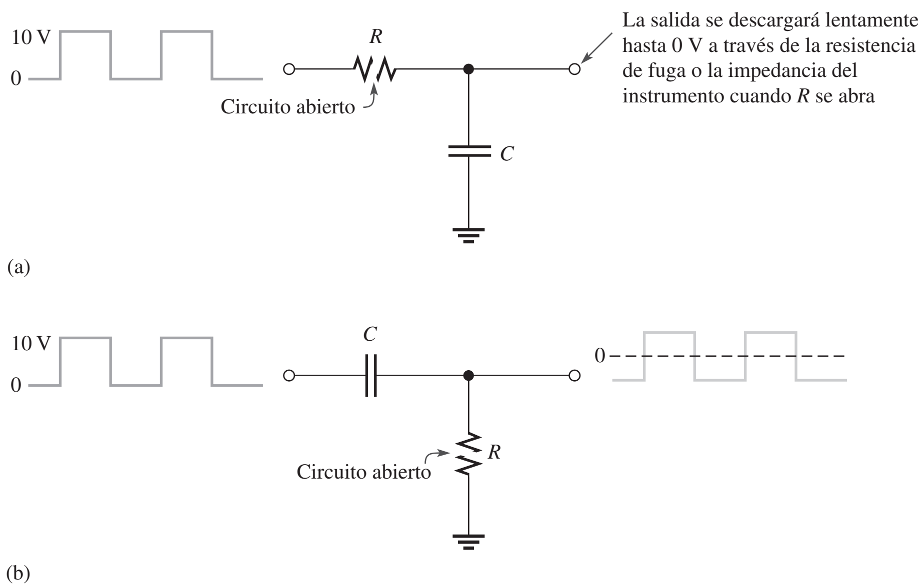


◀ **FIGURA 20–54**

Ejemplos del efecto de un capacitor en cortocircuito.

Resistor abierto

Si el resistor de un integrador *RC* se abre, el capacitor no tiene trayectoria de descarga, e, idealmente, mantendrá su carga. En una situación real, la carga se perderá de manera gradual o el capacitor se descargará lentamente a través del instrumento de medición conectado a la salida. Esto se ilustra en la figura 20-55(a).



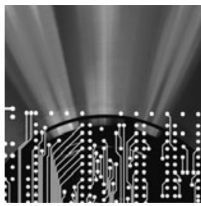
◀ **FIGURA 20–55**

Ejemplos de los efectos de un resistor abierto.

Si el resistor de un diferenciador se abre, la salida se parece a la entrada excepto por el nivel de cd porque el capacitor ahora debe cargarse y descargarse a través de la resistencia extremadamente alta del osciloscopio, como se muestra en la figura 20-55(b).

REPASO DE LA SECCIÓN 20-9

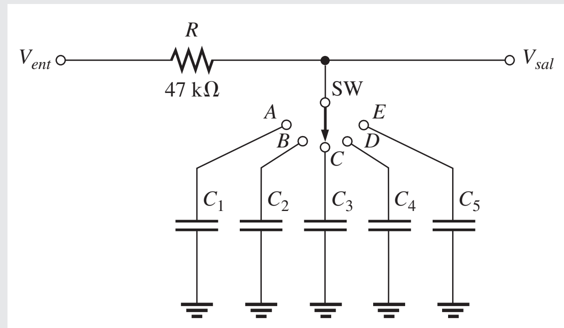
1. **La salida de un integrador *RC* es de cero con una entrada de onda cuadrada. ¿Cuáles son las posibles causas de este problema?**
2. **Si el capacitor de un diferenciador se pone en cortocircuito, ¿cuál es la salida para una entrada de onda cuadrada?**



Una aplicación de circuito

En esta aplicación, se le pedirá construir y probar un circuito de retardo que proporcione cinco tiempos de retardo seleccionables mediante un interruptor. Se elige un integrador *RC* para esta aplicación. La entrada es un pulso de 5 V de larga duración, y la salida se dirige a un circuito activador de umbral que activa la potencia en una parte de un sistema en cualesquiera de los intervalos seleccionados después de ocurrir el pulso original.

En la figura 20-56 se muestra un diagrama esquemático del circuito integrador de retardo seleccionable. El integrador *RC* es excitado por una entrada de pulsos; y la salida es un voltaje exponencialmente creciente que se utiliza para activar un circuito de umbral al nivel de 3.5 V, el cual a su vez activa una parte de un sistema. El concepto básico se muestra en la figura 20-57. En esta aplicación, el tiempo de retardo del integrador se especifica como el tiempo transcurrido desde el borde ascendente hasta el punto donde el voltaje de salida llega a 3.5 V. Los tiempos de retardo especificados aparecen en la tabla 20-1.

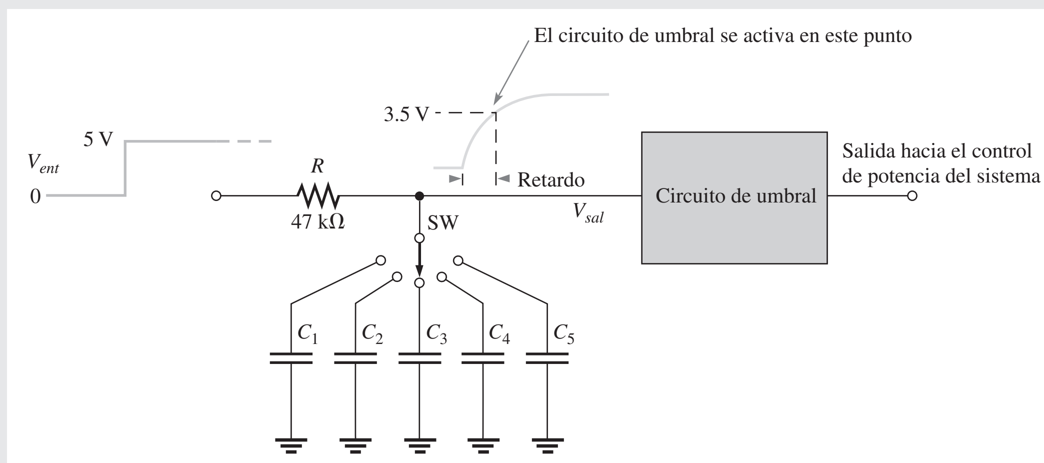


▲ **FIGURA 20–56**

Circuito de retardo en un integrador.

Valores de capacitores

◆ Determine un valor para cada uno de los capacitores que producirán los tiempos de retardo especificados dentro del 10%. Seleccione de la siguiente lista de valores estándar (todos están



▲ **FIGURA 20–57**

lustración de la aplicación de retardo.

▼ **TABLA 20–1**

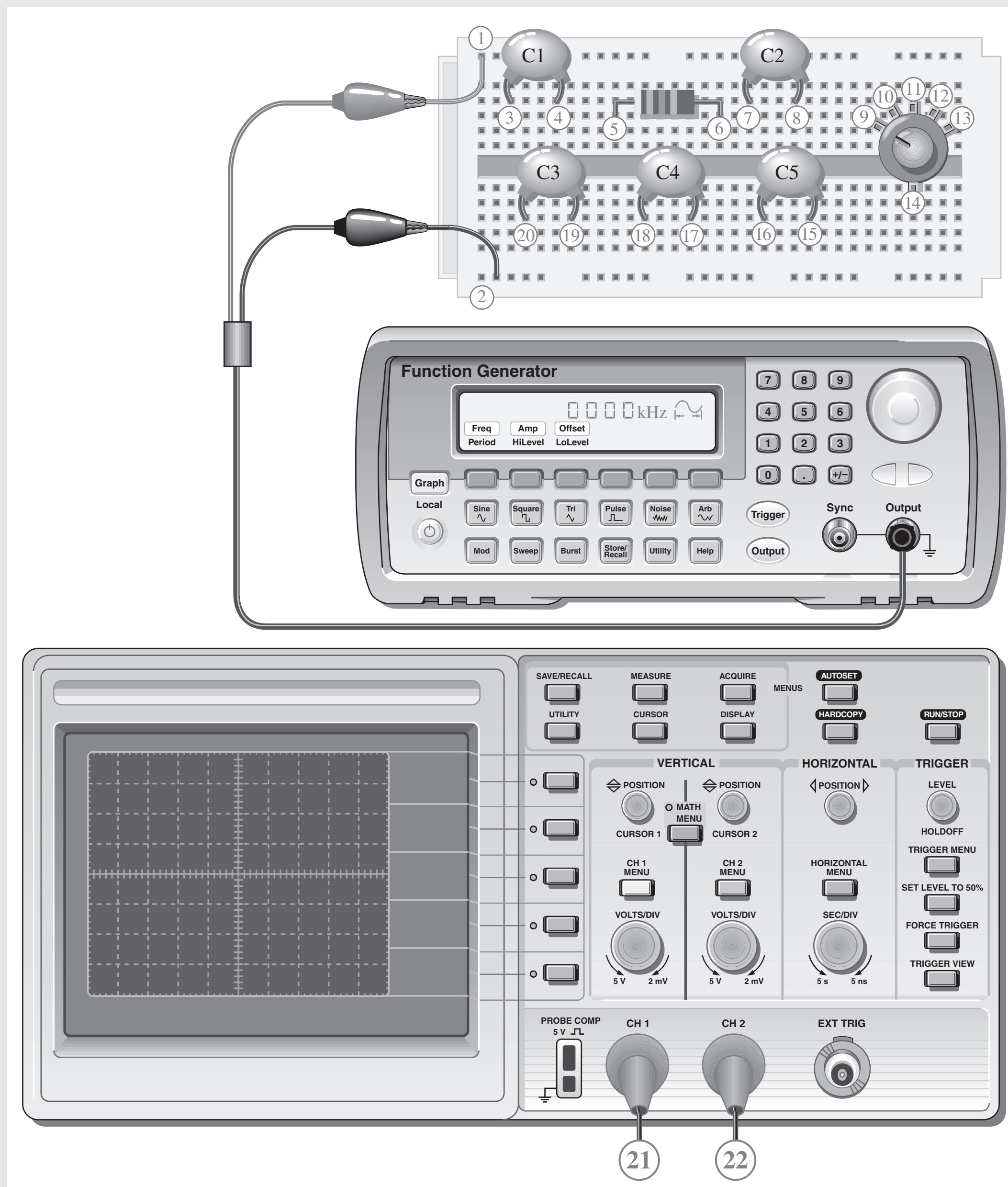
POSICIÓN DE INTERRUPTOR	RETARDO
A	10 ms
B	25 ms
C	40 ms
D	65 ms
E	85 ms

en μF); 0.1, 0.12, 0.15, 0.18, 0.22, 0.27, 0.33, 0.39, 0.47, 0.56, 0.68, 0.82, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2.

Conexiones de circuito

Consulte la figura 20-58. Los componentes del integrador *RC* mostrado en la figura 20-56 están ensamblados, pero no interconectados, en la tarjeta de circuito.

◆ Utilice los números dentro de círculos y desarrolle una lista de alambrado eléctrico de punto a punto para conectar apropiadamente el circuito en la tarjeta.



▲ **FIGURA 20–58**

- Indique, usando números dentro de los círculos apropiados, cómo conectaría usted los instrumentos para probar el circuito.

Procedimiento de prueba

- Especifique los ajustes de función, amplitud y frecuencia mínima necesarios para el generador de funciones para probar todos los tiempos de retardo de salida en la figura 20-58.
- Especifique los ajustes mínimos de osciloscopio necesarios para medir cada uno de los tiempos de retardo especificados en la figura 20-58.

Repaso

1. Para agregar un tiempo de retardo adicional al circuito de la figura 20-57, ¿qué cambios deben hacerse?
2. Se requiere un tiempo de retardo adicional de 100 ms para el circuito de retardo. Determine el valor del capacitor que se debería agregar.

RESUMEN

- En un circuito integrador *RC*, el voltaje de salida se toma a través del capacitor.
- En un circuito diferenciador *RC*, el voltaje de salida se toma a través del resistor.
- En un circuito integrador *RL*, la salida se toma a través del resistor.
- En un circuito diferenciador *RL*, el voltaje de salida se toma a través del inductor.
- En un integrador, cuando el ancho de pulso (t_W) de la entrada es mucho menor que el tiempo transitorio, el voltaje de salida tiende a un nivel constante que es igual al valor promedio de la entrada.
- En un integrador, cuando el ancho del pulso de la entrada es mucho más grande que el tiempo transitorio, el voltaje de salida se aproxima a la forma de la entrada.
- En un diferenciador, cuando el ancho del pulso de la entrada es mucho menor que el tiempo transitorio, el voltaje de salida se aproxima a la forma de la entrada pero con un valor promedio de cero.
- En un diferenciador, cuando el ancho de pulso es mucho más grande que el tiempo transitorio, el voltaje de salida se compone de transitorios abruptos angostos dirigidos hacia positivo y negativo que ocurren en los bordes de entrada y salida de los pulsos de entrada.
- Los flancos ascendente y descendente de una forma de onda pulsante contienen los componentes de alta frecuencia.
- La parte plana del pulso contiene los componentes de baja frecuencia.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas se definen en el glosario incluido al final del libro.

Componente de cd Es el valor promedio de una forma de onda pulsante.

Diferenciador Circuito que produce una salida que se aproxima a la derivada matemática de la entrada.

Integrador Circuito que produce una salida que se aproxima a la integral matemática de la entrada.

Estado permanente Condición de equilibrio de un circuito, ocurre después de un tiempo transitorio inicial.

Constante de tiempo Intervalo fijo de tiempo, establecido por los valores de *R* y *C* o *R* y *L*, que determina la respuesta de un circuito en función del tiempo.

Tiempo transitorio Intervalo igual a aproximadamente cinco constantes de tiempo.

FÓRMULAS

20–1	$t_r = \dfrac{0.35}{f_h}$	Tiempo de subida
20–2	$f_h = \dfrac{0.35}{t_r}$	Frecuencia más alta en relación con el tiempo de subida
20–3	$f_h = \dfrac{0.35}{t_f}$	Frecuencia más alta en relación con el tiempo de caída

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. La salida de un integrador *RC* se toma a través

(a) del resistor **(b)** del capacitor **(c)** de la fuente **(d)** de la bobina

2. Cuando se aplica un pulso de entrada de 10 V con ancho igual a una constante de tiempo a un integrador *RC*, el capacitor se carga a

(a) 10 V **(b)** 5 V **(c)** 6.3 V **(d)** 3.7 V

3. Cuando se aplica un pulso de entrada de 10 V con ancho igual a una constante de tiempo a un diferenciador *RC*, el capacitor se carga a

(a) 6.3 V **(b)** 10 V **(c)** 0 V **(d)** 3.7 V

4. En un integrador *RC*, el pulso de salida se parece mucho al pulso de entrada cuando

(a) τ es mucho más grande que el ancho de pulso **(b)** τ es igual al ancho de pulso

(c) τ es menor que el ancho de pulso **(d)** τ es mucho menor que el ancho de pulso

5. En un diferenciador *RC*, el pulso de salida se parece mucho al pulso de entrada cuando

(a) τ es mucho más grande que el ancho de pulso **(b)** τ es igual al ancho de pulso

(c) τ es menor que el ancho de pulso **(d)** τ es mucho menor que el ancho de pulso

6. Las partes positiva y negativa del voltaje de salida de un diferenciador son iguales cuando

(a) $5\tau < t_W$ **(b)** $5\tau > t_W$

(c) $5\tau = t_W$ **(d)** $5\tau > 0$

(e) tanto (a) como (b) **(f)** tanto (b) como (d)

7. La salida de un integrador *RL* se toma a través

(a) del resistor **(b)** de la bobina **(c)** de la fuente **(d)** del capacitor

8. La corriente máxima posible en un integrador *RL* es

(a) $I = V_p/X_L$ **(b)** $I = V_p/Z$ **(c)** $I = V_p/R$

9. La corriente en un diferenciador *RL* alcanza su valor máximo posible cuando

(a) $5\tau = t_W$ **(b)** $5\tau < t_W$ **(c)** $5\tau > t_W$ **(d)** $\tau = 0.5t_W$

10. Si usted tiene un diferenciador *RC* y uno *RL* con constantes de tiempo iguales uno al lado del otro y aplica el mismo pulso de entrada a ambos,

(a) el *RC* tiene el pulso de salida más ancho

(b) el *RL* tiene los transitorios abruptos más angostos en la salida

(c) la salida de uno es una exponencial creciente y la salida del otro es una exponencial decreciente

(d) puede notar la diferencia observando las formas de onda de salida

EXAMEN RÁPIDO DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Consulte la figura 20-60.

1. Si R_2 se abre, la amplitud del voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

2. Si *C* duplica su valor, la constante de tiempo

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

3. Si R_1 reduce su valor, la amplitud del voltaje de salida

(a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 20-63.

4. Si R_3 se abre, la amplitud del voltaje de salida

(a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

5. Si se aplica un voltaje de cd constante a la entrada, el voltaje de salida
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
6. Si R_1 es de 3.3 kΩ en lugar de 2.2 kΩ, la constante de tiempo
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 20-66.

7. Si L se incrementa, el tiempo de subida (o ascenso) de la salida
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
8. Si el ancho del pulso de entrada se incrementa a 5 ms, la amplitud del pulso de salida
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia

Consulte la figura 20-68.

9. Si R_1 se abre, la amplitud máxima de la salida
   (a) aumenta **(b)** disminuye **(c)** no cambia
10. Si R_2 está en cortocircuito, la amplitud máxima de la salida
   (a) se incrementa **(b)** disminuye **(c)** no cambia

PROBLEMAS

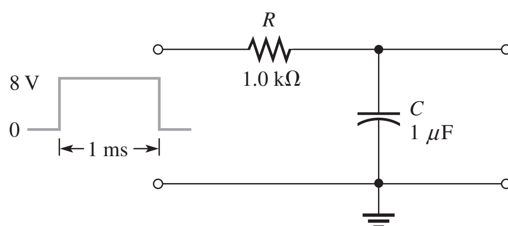
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 20–1 El integrador *RC*

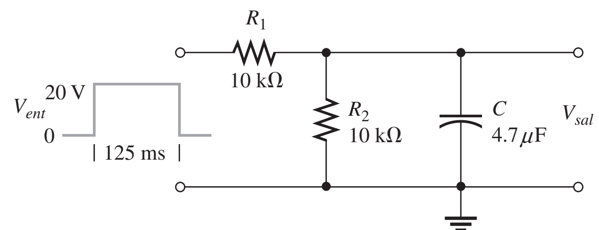
1. Un circuito integrador tiene $R = 2.2$ kΩ en serie con $C = 0.047$ μF. ¿Cuál es la constante de tiempo?
2. Determine cuánto tiempo requiere el capacitor de un circuito integrador para cargarse por completo para cada una de las siguientes combinaciones *RC* en serie:
   (a) $R = 56\ \Omega$, $C = 47\ \mu$F
   (b) $R = 3300\ \Omega$, $C = 0.015\ \mu$F
   (c) $R = 22$ kΩ, $C = 100$ pF
   (d) $R = 5.6$ MΩ, $C = 10$ pF

SECCIÓN 20–2 Respuesta de un integrador RC a un solo pulso

3. Se aplica un pulso de 20 V a un integrador *RC*. El ancho de pulso es igual a una constante de tiempo. ¿A qué voltaje se carga el capacitor durante el pulso? Suponga que inicialmente está descargado.
4. Repita el problema 3 para los siguientes valores de t_W:
   (a) 2τ **(b)** 3τ **(c)** 4τ **(d)** 5τ
5. Trace la forma aproximada del voltaje de salida de un integrador cuando 5τ es mucho menor que el ancho de pulso de una entrada de onda cuadrada de 10 V. Repita el ejercicio para el caso en que 5τ es mucho más grande que el ancho de pulso.
6. Determine el voltaje de salida de un integrador *RC* con un solo pulso de entrada, como se muestra en la figura 20-59. Para pulsos repetitivos, ¿cuánto tiempo requiere este circuito para alcanzar su estado permanente?
7. **(a)** ¿Cuál es el valor de τ en la figura 20-60?
   (b) Trace el voltaje de salida.
8. Trace el voltaje de salida en la figura 20-60 si el ancho de pulso se incrementa a 1.25 s.



▲ FIGURA 20–59

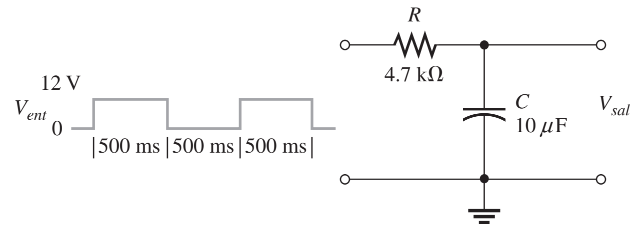


▲ FIGURA 20–60

SECCIÓN 20–3 Respuesta de integradores *RC* a pulsos repetitivos

9. Trace el voltaje de salida del integrador de la figura 20-61 y muestre los voltajes máximos.

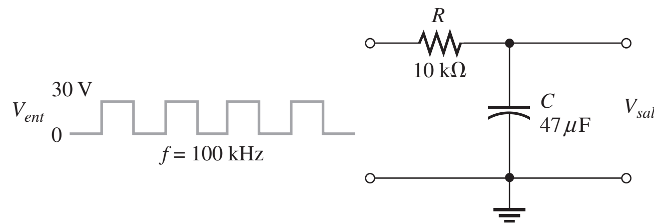
10. Trace el voltaje de salida si el ancho de pulso de V_{ent} en la figura 20-60 cambia a 47 ms y la frecuencia es la misma.



▲ FIGURA 20–61

11. Se aplica una forma de onda pulsante de 1 V a 10 kHz con ciclo de trabajo del 25% a un integrador con $\tau = 25\ \mu$s. Trace la gráfica del voltaje de salida para tres pulsos iniciales. Al principio *C* está descargado.

12. ¿Cuál es el voltaje de salida de estado permanente del integrador *RC* con una entrada de onda cuadrada como se muestra en la figura 20-62?



▲ FIGURA 20–62

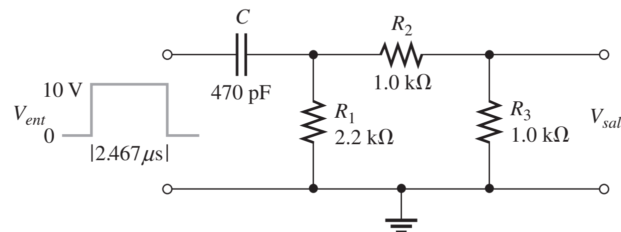
SECCIÓN 20–4 Respuesta de un diferenciador *RC* a un solo pulso

13. Repita el problema 5 para un diferenciador *RC*.

14. Trace otra vez el circuito de la figura 20-59 para transformarlo en un diferenciador, y repita el problema 6.

15. **(a)** ¿Cuál es el valor de τ en la figura 20-63?

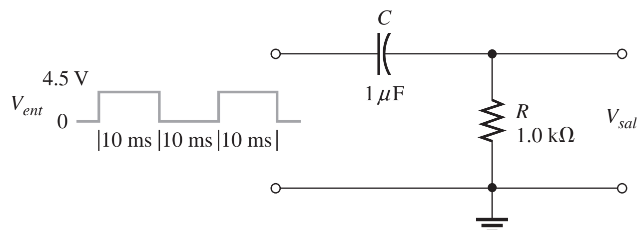
(b) Trace el voltaje de salida.



▲ FIGURA 20–63

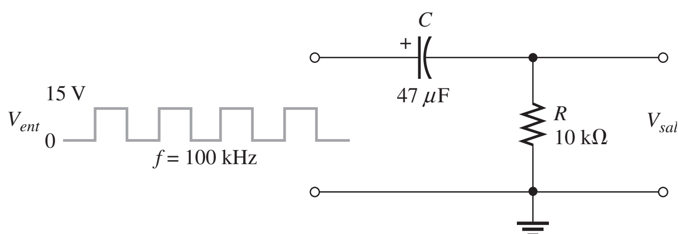
SECCIÓN 20–5 Respuesta de diferenciadores RC a pulsos repetitivos

16. Trace la salida del diferenciador de la figura 20-64, mostrando los voltajes máximos.



▲ **FIGURA 20–64**

17. ¿Cuál es el voltaje de estado permanente del diferenciador con la entrada de onda cuadrada que ilustra la figura 20-65?

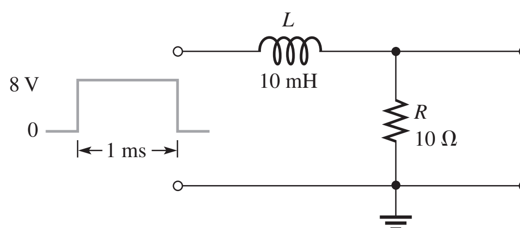


▲ **FIGURA 20–65**

SECCIÓN 20–6 Respuesta de integradores *RL* a entradas de pulsos

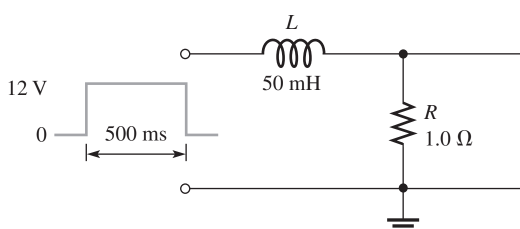
18. Determine el voltaje de salida del circuito 20-66. Se aplica un solo pulso como se muestra.

▶ **FIGURA 20–66**



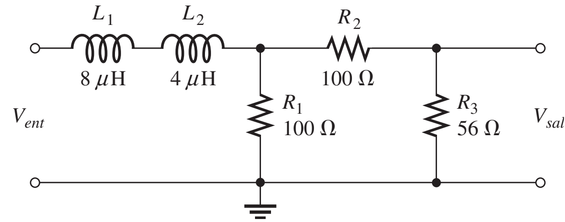
19. Trace el voltaje de salida del integrador en la figura 20-67, muestre voltajes máximos.

▶ **FIGURA 20–67**



20. Determine la constante de tiempo en la figura 20-68. ¿Es un integrador o un diferenciador este circuito?

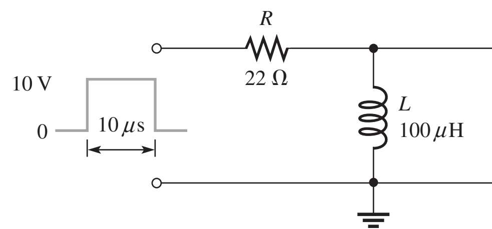
▶ FIGURA 20–68



SECCIÓN 20–7 Respuesta de diferenciadores *RL* a entradas de pulsos

21. **(a)** ¿Cuál es τ en la figura 20-69? **(b)** Trace el voltaje de salida

▶ FIGURA 20–69



22. Trace la forma de onda de salida si al circuito de la figura 20-69 se le aplica una forma de onda pulsante periódica con $t_W = 25\ \mu s$ y $T = 60\ \mu s$.

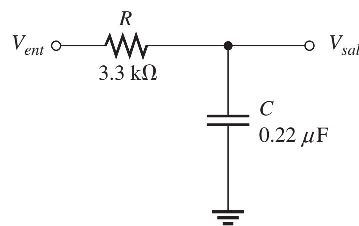
SECCIÓN 20–8 Relación de la respuesta en función del tiempo a la respuesta a la frecuencia

23. ¿Cuál es el componente de la frecuencia más alta en la salida de un integrador con $\tau = 10\ \mu s$? Suponga que $5\tau < t_W$.

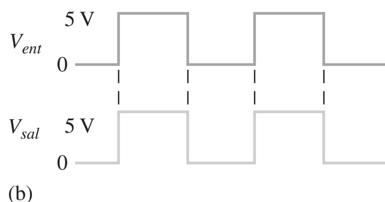
24. Cierta forma de onda pulsante tiene un tiempo de subida o ascenso de 55 ns y tiempo de caída o descenso de 42 ns. ¿Cuál es el componente de la frecuencia más alta en la forma de onda?

SECCIÓN 20–9 Localización de fallas

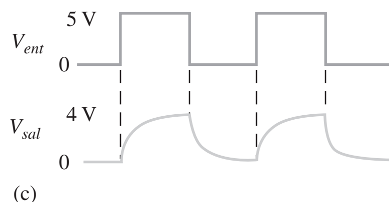
25. En el circuito de la figura 20-70(a), determine la falla o fallas más probables para cada juego de formas de onda que aparece en las partes (b) a (d). V_{ent} es una onda cuadrada con periodo de 8 ms.



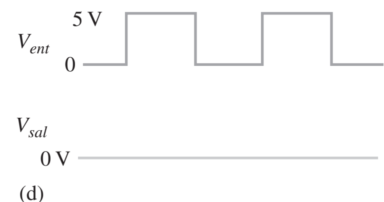
(a)



(b)



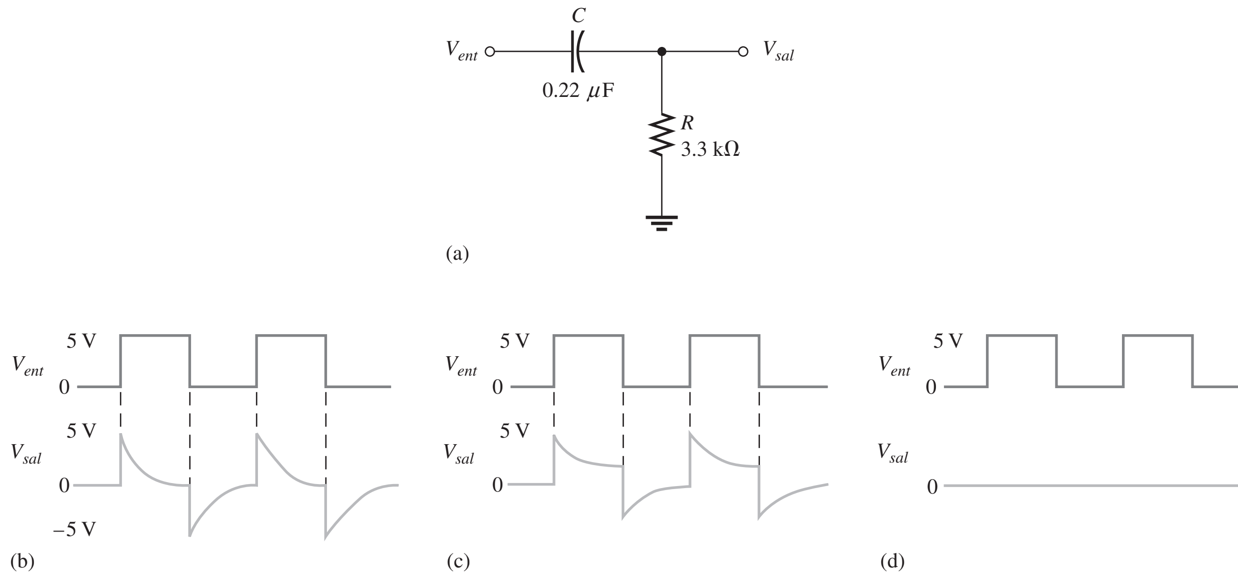
(c)



(d)

▲ FIGURA 20–70

26. Determine la falla o fallas más probables, si las hay, en el circuito de la figura 20-71(a) para cada juego de formas de onda que aparece en las partes (b) a (d). V_{ent} es una onda cuadrada con periodo de 8 ms.



▲ **FIGURA 20–71**



Localización y análisis de fallas con Multisim

Estos problemas requieren el uso del CD-ROM Multisim.

27. Abra el archivo P20-27 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

28. Abra el archivo P20-28 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

29. Abra el archivo P20-29 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

30. Abra el archivo P20-30 y determine si hay una falla. Si la hay, localícela.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

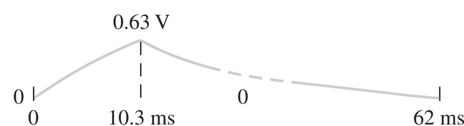
SECCIÓN 20–1 **El integrador *RC***

1. Un integrador es un circuito *RC* dispuesto en serie en el cual la salida es través del capacitor.
2. Un voltaje aplicado a la entrada provoca que el capacitor se cargue. Un corto a través de la entrada causa que el capacitor se descargue.

SECCIÓN 20–2 **Respuesta de un integrador *RC* a un solo pulso**

1. Para que la salida de un integrador alcance amplitud, $5\tau \leq t_W$.
2. $V_{sal(máx)} = 630$ mV; $t_{descarga} = 51.7$ ms
3. Vea la figura 20-72.

▶ **FIGURA 20–72**



4. No, *C* no se cargará por completo.
5. La salida tiene aproximadamente la forma de la entrada cuando $5\tau << t_W$ (5τ es mucho menor que t_W).

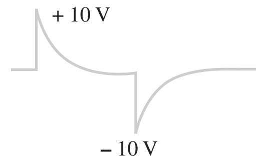
SECCIÓN 20–3 Respuesta de integradores *RC* a pulsos repetitivos

1. C se cargará y descargará por completo cuando $5\tau \leq t_W$ y $5\tau \leq$ tiempo entre pulsos.
2. Cuando $\tau \ll t_W$, la salida es aproximadamente igual a la entrada.
3. Tiempo transitorio.
4. La respuesta de estado permanente es la respuesta después de que ha pasado el tiempo transitorio.
5. El valor promedio de la salida es igual al valor promedio del voltaje de entrada.

SECCIÓN 20–4 Respuesta de un diferenciador RC a un solo pulso

1. Vea la figura 20-73.

▶ FIGURA 20–73



2. La salida se parece a la entrada cuando $5\tau \gg t_W$.
3. Las salidas parecen ser transitorios abruptos positivos y negativos.
4. V_R se irá hasta -10 V.

SECCIÓN 20–5 Respuesta de diferenciadores *RC* a pulsos repetitivos

1. C se cargará y descargará por completo cuando $5\tau \leq t_W$ y $5\tau \leq$ tiempo entre pulsos.
2. Las salidas parecen ser transitorios abruptos positivos y negativos.
3. El valor promedio es de 0 V.

SECCIÓN 20–6 Respuesta de integradores *RL* a entradas de pulsos

1. La salida se toma a través del resistor.
2. La salida alcanza la amplitud de entrada cuando $5\tau \leq t_W$.
3. La salida tiene la forma aproximada de la entrada cuando $5\tau \ll t_W$.

SECCIÓN 20–7 Respuesta de diferenciadores *RL* a entradas de pulsos

1. La salida se toma a través del inductor.
2. La salida tiene la forma aproximada de la entrada cuando $5\tau \gg t_W$.
3. V_L se irá hasta –8 V.

SECCIÓN 20–8 Relación de la respuesta en función del tiempo a la respuesta a la frecuencia

1. Un integrador es un filtro pasabajas.
2. Un diferenciador es un filtro pasaaltas.
3. $f_{máx} = 350\text{ kHz}$

SECCIÓN 20–9 Localización de fallas

1. Un resistor abierto o un capacitor en cortocircuito pueden provocar una salida de 0 V.
2. Si C está en cortocircuito, la salida es igual a la entrada.

Una aplicación de circuito

1. Se debe agregar un capacitor, y el interruptor sustituido debe cambiarse por otro de seis posiciones.
2. $C_6 = 100\text{ ms}/[(1.204)(47\text{ k}\Omega)] = 1.77\ \mu\text{F}$ (use 1.8 μF)

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

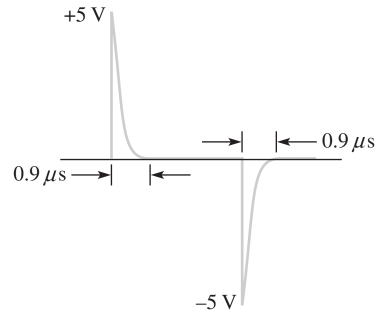
20–1 8.65 V

20–2 24.7 V

20–3 1.08 V

20–4 Vea la figura 20-74.

▶ **FIGURA 20–74**



20–5 892 mV

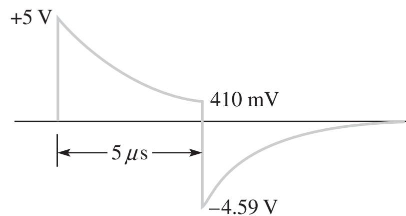
20–6 Imposible con un reóstato de 50 Ω

20–7 20 V

20–8 2.5 kΩ

20–9 Vea la figura 20-75.

▶ **FIGURA 20–75**



20–10 20 kΩ

20–11 23.3 MHz

AUTOEVALUACIÓN

1. (b) **2.** (c) **3.** (a) **4.** (d) **5.** (a) **6.** (e) **7.** (a) **8.** (c) **9.** (b) **10.** (d)

EXAMEN DE DINÁMICA DE CIRCUITOS

1. (b) **2.** (a) **3.** (c) **4.** (a) **5.** (b) **6.** (a) **7.** (a) **8.** (a) **9.** (c) **10.** (a)

SISTEMAS TRIFÁSICOS EN APLICACIONES DE POTENCIA

21

ESQUEMA DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- Describir máquinas trifásicas básicas
- Analizar las ventajas de los generadores trifásicos en aplicaciones de potencia
- Analizar las conexiones de un generador trifásico
- Analizar generadores trifásicos con cargas trifásicas
- Analizar mediciones de potencia en sistemas trifásicos

TÉRMINOS CLAVE

- Carga balanceada
- Corriente de fase (I_θ)
- Corriente de línea (I_L)
- Devanado de campo
- Estator
- Rotor
- Voltaje de fase (V_θ)
- Voltaje de línea (V_L)

VISITE EL SITIO WEB RELACIONADO

Auxiliares de estudio para este capítulo están disponibles en
http://www.pearsoneducacion.net/floyd

INTRODUCCIÓN

En la cobertura del análisis de ca en capítulos anteriores, sólo se consideraron fuentes sinusoidales monofásicas. En el capítulo 11, usted aprendió cómo se puede generar un voltaje sinusoidal mediante la rotación de un conductor a velocidad constante en un campo magnético, y se introdujeron los conceptos básicos de generadores de ca.

En este capítulo, se examina el generador básico de formas de onda sinusoidales trifásicas. Se abordan las ventajas de los sistemas trifásicos en aplicaciones de potencia, y se introducen varios tipos de conexiones trifásicas y de medición de potencia.

21–1 Introducción a máquinas trifásicas

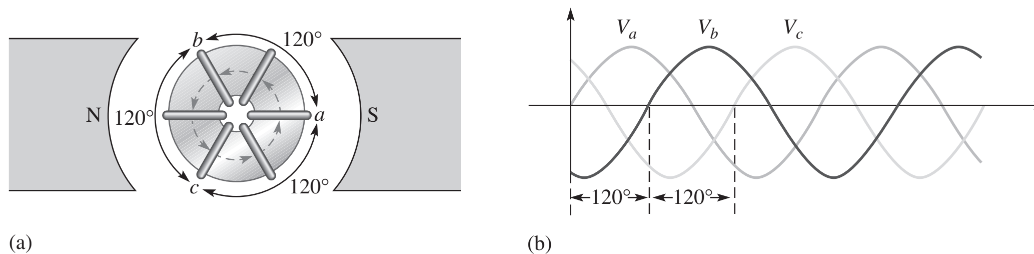
Los generadores trifásicos producen al mismo tiempo tres voltajes sinusoidales que están separados por ciertos ángulos de fase constante. Esta generación multifásica se logra haciendo girar varios devanados a través de un campo magnético. Asimismo, los motores trifásicos operan con entradas sinusoidales trifásicas.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Describir las máquinas trifásicas básicas**
  - Analizar un generador trifásico básico
  - Describir la construcción de un generador trifásico
  - Describir un motor de inducción trifásico básico

El generador

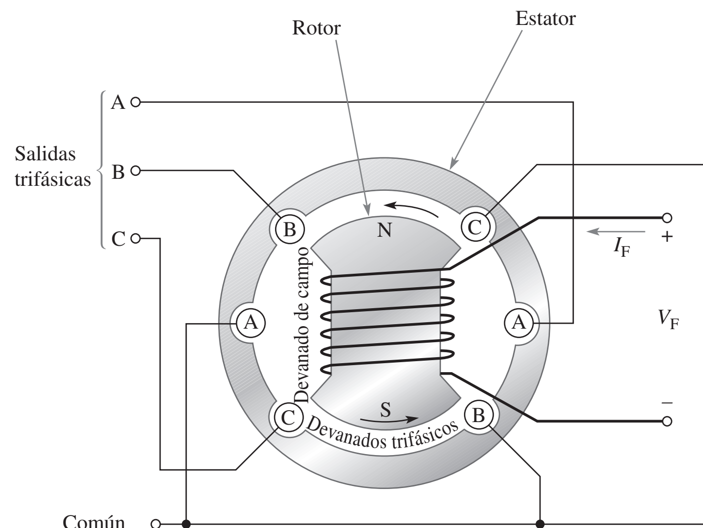
La figura 21-1(a) muestra un generador con tres devanados separados colocados a intervalos de 120° alrededor del rotor. Esta configuración genera tres voltajes sinusoidales separados entre sí por ángulos de fase de 120°, como se muestra en la parte (b).



▲ **FIGURA 21–1**

Generador trifásico básico.

En la figura 21-2 se muestra un generador trifásico de dos polos. La mayoría de los generadores prácticos son de esta forma. En lugar de utilizar un imán permanente en una posición fija, se utiliza un electroimán rotatorio. Éste se crea haciendo pasar una corriente directa (I_F) a través de un devanado alrededor del **rotor**, como se muestra. Este devanado se llama **devanado de campo**.



▶ **FIGURA 21–2**

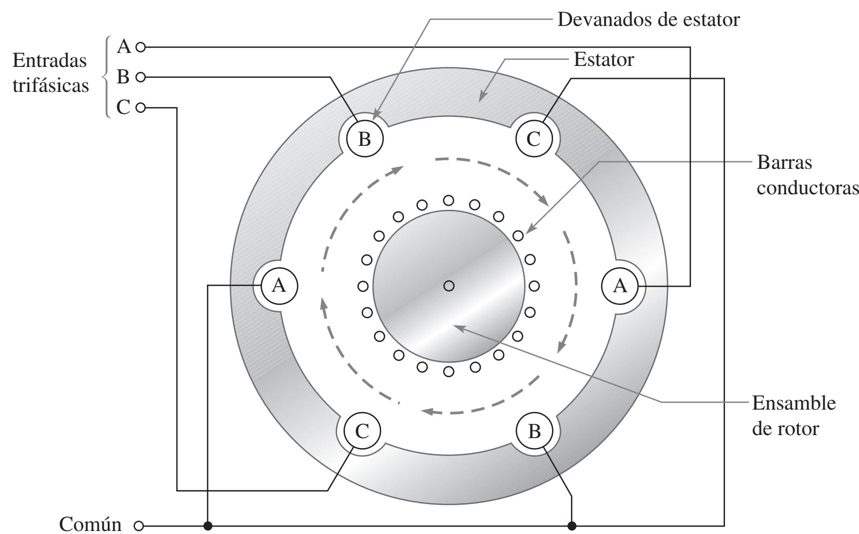
Generador trifásico de dos polos.

La corriente directa se aplica por medio de un ensamble de escobillas y un anillo rozante. La parte externa estacionaria del generador se llama **estator**. Tres devanados distintos están colocados a 120° uno de otro alrededor del estator; en estos devanados se inducen voltajes trifásicos a medida que el campo magnético gira, como indica la figura 21-1(b)

El motor

El tipo más común de motor de ca es el motor trifásico de inducción. Básicamente, consiste en un estator con devanados de estator y un ensamblado de rotor construido conforme a un marco cilíndrico de barras metálicas integradas en una configuración tipo **jaula de ardilla.** La figura 21-3 muestra la vista esquemática de un extremo de este arreglo.

Cuando se aplican voltajes trifásicos a los devanados del estator, se establece un campo magnético rotatorio. Conforme el campo magnético gira, son inducidas corrientes dentro de los conductores del rotor de jaula de ardilla. La interacción de las corrientes inducidas y del campo magnético genera fuerzas que provocan que el rotor también gire.



◀ **FIGURA 21–3**

Motor de inducción trifásico básico.

REPASO DE LA SECCIÓN 21-1
Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

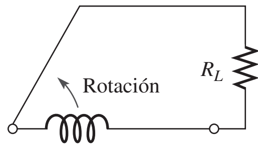
1. Describa el principio básico utilizado en generadores de ca.
2. ¿Cuántos devanados de armadura se requieren en un generador trifásico?

21–2 GENERADORES EN APLICACIONES DE POTENCIA

Existen ciertas ventajas en el uso de generadores trifásicos para suministrar potencia a una carga sobre la utilización de una máquina monofásica.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar las ventajas de los generadores trifásicos en aplicaciones de potencia**
  - Explicar la ventaja del cobre
  - Comparar sistemas monofásicos y trifásicos en función de la ventaja del cobre
  - Explicar la ventaja de la potencia constante
  - Explicar la ventaja de un campo magnético rotatorio constante



▲ **FIGURA 21–4**

Representación simplificada de un generador monofásico conectado a una carga resistiva.

El diámetro del alambre de cobre requerido para transportar corriente desde un generador hasta una carga se reduce cuando se utiliza un generador trifásico en lugar de uno monofásico.

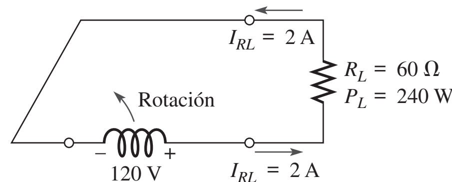
La figura 21-4 es una representación simplificada de un generador monofásico conectado a una carga resistiva. El símbolo de bobina representa el devanado del generador.

Por ejemplo, en el devanado se induce un voltaje sinusoidal monofásico y se aplica a una carga de 60 Ω, como indica la figura 21-5. La corriente resultante es

$$\mathbf{I}_{RL} = \frac{120\angle 0^\circ \text{ V}}{60\angle 0^\circ \ \Omega} = 2\angle 0^\circ \text{ A}$$

▶ **FIGURA 21–5**

Ejemplo monofásico.



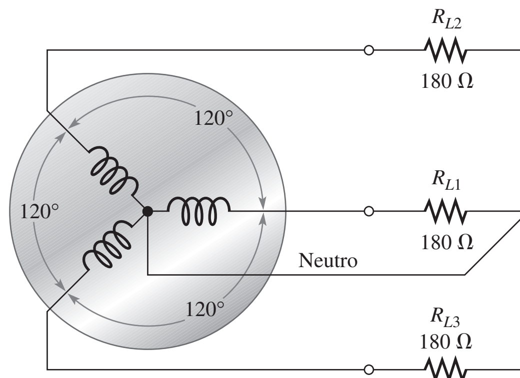
La corriente total que debe ser suministrada por el generador a la carga es de 2 ∠ 0° A. Esto significa que cada uno de los dos conductores que transportan corriente hasta y desde la carga debe ser capaz de manejar 2 A; por tanto, el total de la sección transversal de cobre debe manejar 4 A. (La sección transversal de cobre mide la cantidad total de alambre requerido con base en su tamaño físico en relación con su diámetro.) La potencia total suministrada a la carga es

$$P_{L(tot)} = I_{RL}^2 R_L = 240 \text{ W}$$

La figura 21-6 muestra una representación simplificada de un generador trifásico conectado a tres cargas resistivas de 180 Ω. Se requeriría un sistema monofásico equivalente para alimentar tres resistores de 180 Ω en paralelo, con lo que se crearía una resistencia de carga efectiva de 60 Ω. Las bobinas representan los devanados del generador separados por 120°.

▶ **FIGURA 21–6**

Representación simplificada de un generador trifásico con cada fase conectada a una carga de 180 Ω.

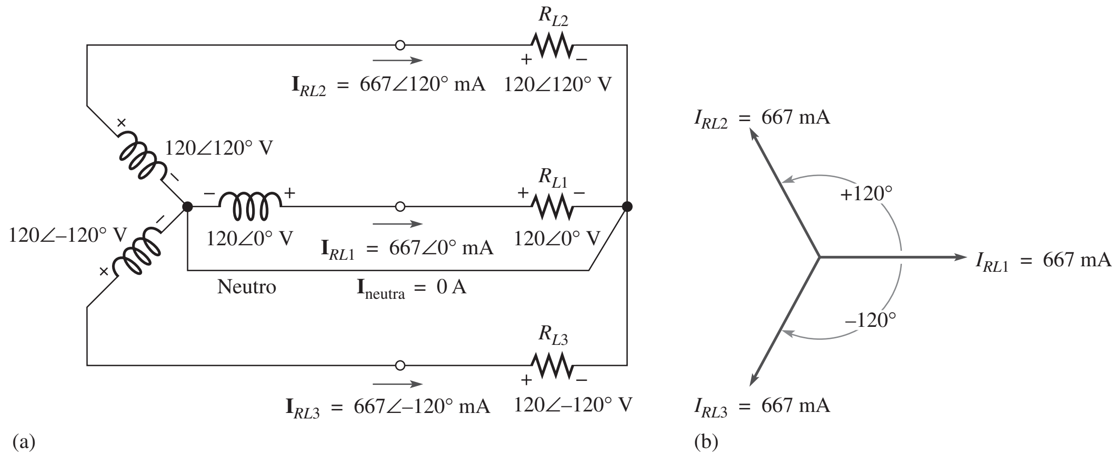


El voltaje entre las terminales de R_{L1} es de 120 ∠ 0° V, en R_{L2} es de 120 ∠ 120° V, y en R_{L3} es de 120 ∠ −120° V, como indica la figura 21-7(a). La corriente suministrada por cada devanado a su respectiva carga es como sigue:

$$\mathbf{I}_{RL1} = \frac{120\angle 0^\circ \text{ V}}{180\angle 0^\circ \ \Omega} = 667\angle 0^\circ \text{ mA}$$

$$\mathbf{I}_{RL2} = \frac{120\angle 120^\circ \text{ V}}{180\angle 0^\circ \ \Omega} = 667\angle 120^\circ \text{ mA}$$

$$\mathbf{I}_{RL3} = \frac{120\angle -120^\circ \text{ V}}{180\angle 0^\circ \ \Omega} = 667\angle -120^\circ \text{ mA}$$



▲ **FIGURA 21–7**

Ejemplo trifásico.

La potencia total suministrada a la carga es

$$P_{L(tot)} = I_{RL1}^2 R_{L1} + I_{RL2}^2 R_{L2} + I_{RL3}^2 R_{L3} = 240\text{ W}$$

Ésta es la misma potencia total suministrada a la carga por el sistema monofásico analizado previamente.

Advierta que se requieren cuatro conductores, incluido el neutro, para transportar las corrientes hasta y desde las cargas. La corriente en cada uno de los tres conductores es de 667 mA, como indica la figura 21-7(a). La corriente en el conductor neutro es la suma fasorial de las tres corrientes de carga y es igual a cero, según demuestra la siguiente ecuación, con referencia al diagrama fasorial de la figura 21-7(b).

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{RL1} + \mathbf{I}_{RL2} + \mathbf{I}_{RL3} &= 667\angle 0^\circ\text{ mA} + 667\angle 120^\circ\text{ mA} + 667\angle -120^\circ\text{ mA}\\ &= 667\text{ mA} - 333.5\text{ mA} + j578\text{ mA} - 333.5\text{ mA} - j578\text{ mA}\\ &= 667\text{ mA} - 667\text{ mA} = 0\text{ A}\end{aligned}$$

Esta condición, donde todas las corrientes a través de las cargas son iguales y la corriente a través del neutro es de cero, se conoce como condición de **carga balanceada**.

Toda la sección transversal de cobre debe manejar 667 mA + 667 mA + 667 mA + 0 mA = 2A. Este resultado demuestra que se requiere considerablemente menos cobre para suministrar la misma potencia con un sistema trifásico que el requerido con un sistema monofásico. La cantidad de cobre es una consideración importante en sistemas de distribución de potencia.

EJEMPLO 21–1 Compare las secciones transversales totales de cobre en función de su capacidad de conducción de corriente para sistemas monofásicos y trifásicos de 120 V con resistencias de carga efectivas de 12 Ω.

Solución *Sistema monofásico*: La corriente total a través de la carga es

$$I_{RL} = \frac{120\text{ V}}{12\ \Omega} = 10\text{ A}$$

El conductor hacia la carga debe transportar 10 A, y el conductor desde la carga también debe transportar 10 A.

La sección transversal total de cobre, por tanto, debe ser suficiente para manejar $2 \times 10\text{ A} = 20\text{ A}$.

Sistema trifásico: Para una resistencia de carga efectiva de 12 Ω, el generador trifásico alimenta tres resistores de carga de 36 Ω cada uno. La corriente en cada resistor de carga es

$$I_{RL} = \frac{120\text{ V}}{36\ \Omega} = 3.33\text{ A}$$

Cada uno de los tres conductores que alimentan la carga balanceada debe conducir 3.33 A, y la corriente en el neutro es de cero.

Por tanto, la sección transversal total de cobre debe ser suficiente para manejar 3 × 3.33 A ≅ 10 A. Esto es significativamente menor que lo requerido para el sistema monofásico con una carga equivalente.

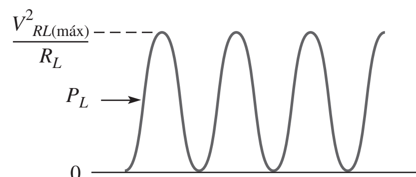
Problema relacionado* Compare las secciones transversales totales de cobre en función de su capacidad de conducción de corriente para sistemas monofásicos y trifásicos de 240 V con resistencias de carga efectivas de 100 Ω.

*Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

Una segunda ventaja de los sistemas trifásicos sobre el sistema monofásico es que los trifásicos producen una cantidad constante de potencia en la carga. Como indica la figura 21-8, la potencia entregada a la carga fluctúa como el cuadrado del voltaje sinusoidal dividido entre la resistencia. La potencia cambia desde un máximo de $V^2_{RL(\text{máx})}/R_L$ hasta un mínimo de cero en una frecuencia igual a dos veces la del voltaje.

▶ **FIGURA 21–8**

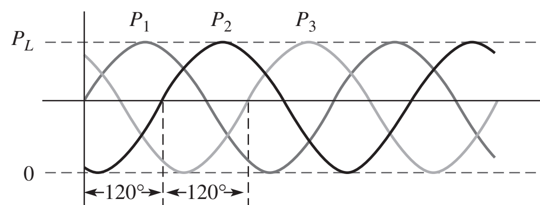
Potencia suministrada a una carga monofásica (curva sen²).



La forma de onda de potencia a través de uno de los resistores de carga en un sistema trifásico está desfasada en 120° con respecto a las formas de onda de potencia a través de las demás cargas, como se muestra en la figura 21-9. Un examen de las formas de onda de potencia muestra que al sumar tres valores instantáneos, la suma siempre es constante e igual a $V^2_{RL(\text{máx})}/R_L$. Una potencia de carga constante significa una conversión uniforme de energía mecánica en energía eléctrica, la cual es una consideración importante en muchas aplicaciones de potencia.

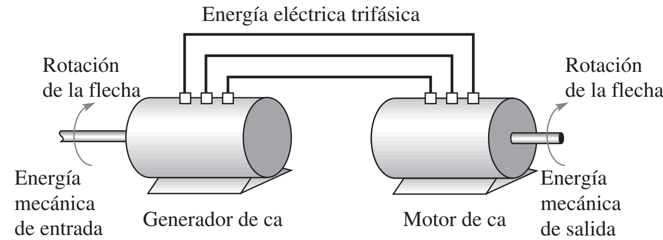
▶ **FIGURA 21–9**

Potencia monofásica ($P_L = V^2_{RL(\text{máx})}/R_L$).



En muchas aplicaciones, se utilizan generadores de ca para alimentar motores de ca y efectuar la conversión de energía eléctrica en energía mecánica en la forma de rotación del eje de motor. La energía original para la operación del generador puede venir de cualquiera de diversas fuentes, tales como plantas hidroeléctricas o de vapor. La figura 21-10 ilustra el concepto básico.

Cuando se conecta un generador trifásico a los devanados del motor, dentro del motor se produce un campo magnético que tiene una densidad de flujo constante y gira a la frecuencia de la



◀ FIGURA 21–10

Ejemplo simple de conversión de energía mecánica a eléctrica a mecánica.

onda seno trifásica. El rotor del motor es impulsado a una velocidad de rotación constante por el campo magnético rotatorio, y se produce una rotación constante de la flecha, lo cual es una ventaja de los sistemas trifásicos.

Un sistema monofásico resulta inadecuado en muchas aplicaciones porque produce un campo magnético cuya densidad de flujo fluctúa e invierte su dirección de rotación durante cada ciclo sin proporcionar la ventaja de rotación constante.

REPASO DE LA SECCIÓN 21-2

1. Enumere tres ventajas de los sistemas trifásicos sobre los monofásicos.
2. ¿Qué ventaja es más importante en conversiones de energía mecánica a eléctrica?
3. ¿Qué ventaja es más importante en conversiones de energía eléctrica a mecánica?

21–3 TIPOS DE GENERADORES TRIFÁSICOS

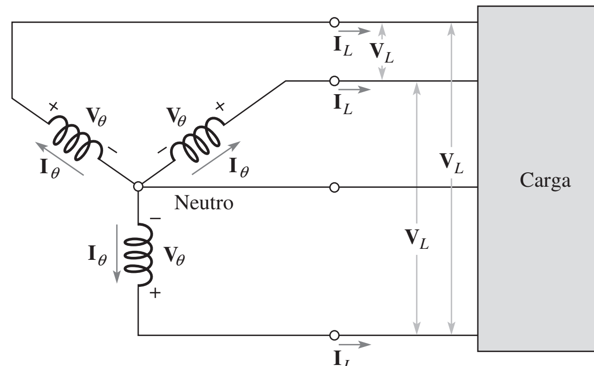
En las secciones previas, la conexión Y se utilizó como ilustración. En esta sección, se examina la conexión Y más a fondo y se introduce un segundo tipo: la conexión Δ.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar conexiones de generador trifásico**
  - Analizar el generador conectado en Y
  - Analizar el generador conectado en Δ

El generador conectado en Y

Un sistema conectado en Y puede ser un sistema de tres hilos o, cuando se utiliza el neutro, de cuatro hilos, según muestra la figura 21-11, conectado a una carga generalizada, la cual se indica mediante el bloque sombreado. Recuerde que cuando las cargas están perfectamente balancea-



◀ FIGURA 21–11

Generador conectado en Y.

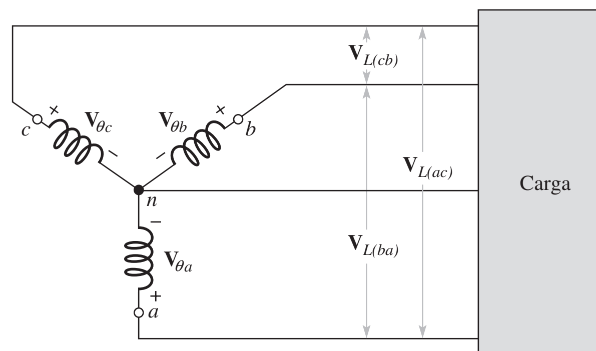
das, la corriente neutra es de cero; por tanto, el conducto neutro es innecesario. Sin embargo, para casos en que las cargas no son iguales (están desbalanceadas), un hilo neutro resulta esencial para proporcionar una trayectoria para el retorno de la corriente porque el valor de la corriente neutra no es cero.

Los voltajes entre los devanados del generador se llaman **voltajes de fase (V_θ)**, y las corrientes a través de los devanados se llaman **corrientes de fase (I_θ).** Asimismo, las corrientes en las líneas que conectan los devanados del generador a la carga se llaman **corrientes de línea (I_L)**, y los voltajes entre las líneas se llaman **voltajes de línea (V_L).** Advierta que la magnitud de cada corriente de línea es igual a la corriente de fase correspondiente en el circuito conectado en Y.

Ecuación 21–1

$$I_L = I_\theta$$

En la figura 21-12, las terminaciones de línea de los devanados se designan mediante *a*, *b* y *c*, y el punto neutro se designa con *n*. Estas letras se agregan como subíndices a la fase y a las corrientes de línea para indicar la fase con la cual está asociada cada una. Los voltajes de fase también se designan en la misma forma. Advierta que los voltajes fasoriales siempre son positivos en el extremo de la terminal del devanado y negativos en el punto neutro. Los voltajes de línea son desde la terminal de un devanado hasta la otra terminal, tal como indican los subíndices de doble letra. Por ejemplo, $\mathbf{V}_{L(ba)}$ es el voltaje de línea desde *b* hasta *a*.



▲ **FIGURA 21–12**

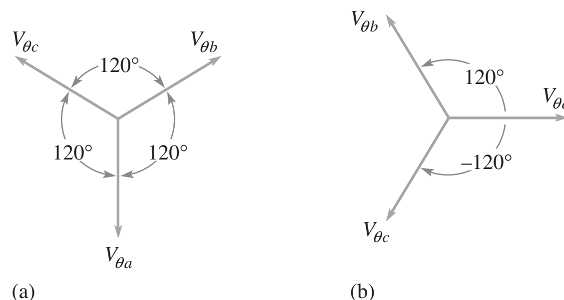
Voltajes de fase y voltajes de línea en un sistema conectado en Y.

La figura 21-13(a) muestra un diagrama fasorial de los voltajes de fase. Mediante rotación de los fasores, como se muestra en la parte (b), a $V_{\theta a}$ se le asigna un ángulo de referencia de cero, y las expresiones polares para los voltajes fasoriales son las siguientes:

$$\mathbf{V}_{\theta a} = V_{\theta a}\angle 0^\circ$$
$$\mathbf{V}_{\theta b} = V_{\theta b}\angle 120^\circ$$
$$\mathbf{V}_{\theta c} = V_{\theta c}\angle -120^\circ$$

▶ **FIGURA 21–13**

Diagrama de voltaje fasorial.



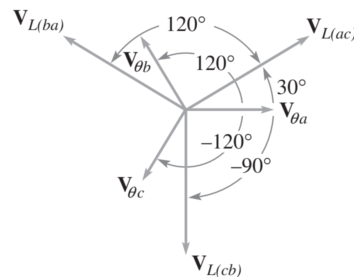
Hay tres voltajes de línea: uno entre *a* y *b*, uno entre *a* y *c*, y otro entre *b* y *c*. Es posible demostrar que la magnitud de cada voltaje de línea es igual a $\sqrt{3}$ veces la magnitud del voltaje de fase y que hay un ángulo de fase de 30° entre cada voltaje de línea y el voltaje de fase más cercano.

$$V_L = \sqrt{3}V_\theta$$ **Ecuación 21–2**

Como las magnitudes de todos los voltajes de fase son iguales,

$$\mathbf{V}_{L(ba)} = \sqrt{3}V_\theta\angle 150^\circ$$
$$\mathbf{V}_{L(ac)} = \sqrt{3}V_\theta\angle 30^\circ$$
$$\mathbf{V}_{L(cb)} = \sqrt{3}V_\theta\angle -90^\circ$$

El diagrama fasorial del voltaje de línea se muestra en la figura 21-14 superpuesto sobre el diagrama fasorial de los voltajes de fase. Observe que hay un ángulo de fase de 30° entre cada voltaje de línea y el voltaje de fase más cercano, y una separación de 120° entre los voltajes de línea.

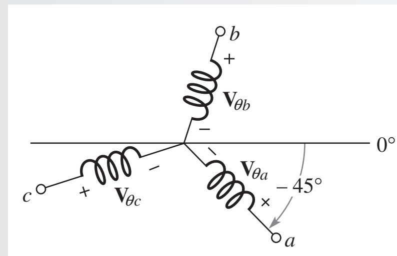


▲ **FIGURA 21–14**

Diagrama de fase de los voltajes de fase y los voltajes de línea en un sistema trifásico, conectado en Y.

EJEMPLO 21–2 En la figura 21-15 se muestra la posición instantánea de un generador de ca conectado en Y. Si la magnitud de cada voltaje de fase es de 120 V rms, determine la magnitud de cada voltaje de línea y trace el diagrama fasorial.

▶ **FIGURA 21–15**

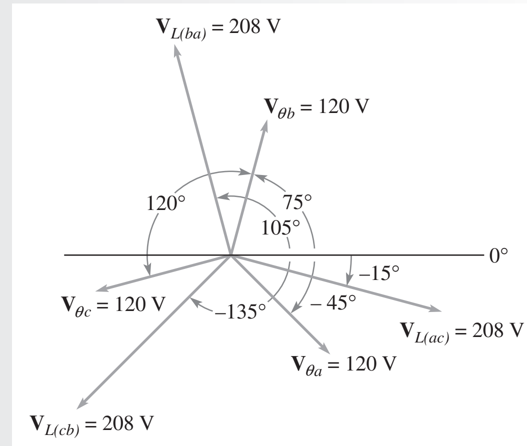


Solución La magnitud de cada voltaje de línea es

$$V_L = \sqrt{3}V_\theta = \sqrt{3}(120\text{ V}) = \mathbf{208\text{ V}}$$

El diagrama fasorial para la posición instantánea dada del generador se muestra en la figura 21-16.

▶ FIGURA 21–16



Problema relacionado Determine la magnitud del voltaje de línea si la posición del generador indicada en la figura 21-16 gira otros 45° en el sentido de las manecillas del reloj.

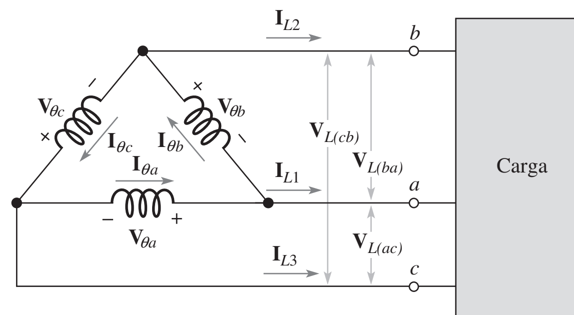
El generador conectado en Δ

En el generador conectado en Y, dos magnitudes de voltaje están disponibles en las terminales del sistema de cuatro hilos: el voltaje de fase y el voltaje de línea. Asimismo, en el generador conectado en Y, la corriente de línea es igual a la corriente de fase. Tenga en cuenta estas características conforme examinemos el generador conectado en Δ.

Los devanados de un generador trifásico pueden ser reacomodados para formar un generador conectado en Δ, como se muestra en la figura 21-17. Al examinar este diagrama, puede advertirse que las magnitudes de los voltajes de línea y de fase son iguales, pero las corrientes de línea no son iguales a las corrientes de fase.

▶ FIGURA 21–17

Generador conectado en Δ.



Como este sistema es de tres hilos, sólo está disponible una sola magnitud de voltaje, expresada como

Ecuación 21–3

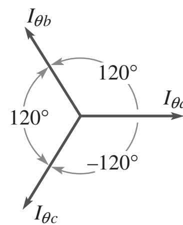
$$V_L = V_\theta$$

La magnitud de todos los voltajes de fase es igual; por tanto, los voltajes de línea se expresan en forma polar como sigue:

$$\mathbf{V}_{L(ac)} = V_\theta\angle 0°$$
$$\mathbf{V}_{L(ba)} = V_\theta\angle 120°$$
$$\mathbf{V}_{L(cb)} = V_\theta\angle -120°$$

El diagrama fasorial de las corrientes de fase se muestra en la figura 21-18, y las expresiones polares de cada corriente son las siguientes:

$$\mathbf{I}_{\theta a} = I_{\theta a}\angle 0°$$
$$\mathbf{I}_{\theta b} = I_{\theta b}\angle 120°$$
$$\mathbf{I}_{\theta c} = I_{\theta c}\angle -120°$$



◀ **FIGURA 21–18**

Diagrama de corriente de fase para el sistema conectado en Δ.

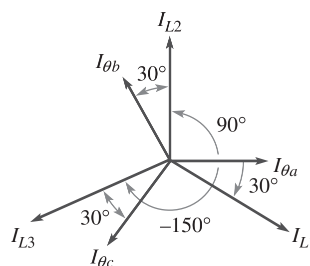
Se puede demostrar que la magnitud de cada corriente de línea es igual a $\sqrt{3}$ veces la magnitud de la corriente de fase y que hay un ángulo de fase de 30° entre cada corriente de línea y la corriente de fase más cercana.

$$I_L = \sqrt{3}I_\theta$$ **Ecuación 21–4**

Como las corrientes de fase son iguales en magnitud,

$$\mathbf{I}_{L1} = \sqrt{3}I_\theta\angle -30°$$
$$\mathbf{I}_{L2} = \sqrt{3}I_\theta\angle 90°$$
$$\mathbf{I}_{L3} = \sqrt{3}I_\theta\angle -150°$$

El diagrama fasorial de corriente se muestra en la figura 21-19.



◀ **FIGURA 21–19**

Diagrama fasorial de corrientes de fase y corrientes de línea.

EJEMPLO 21–3

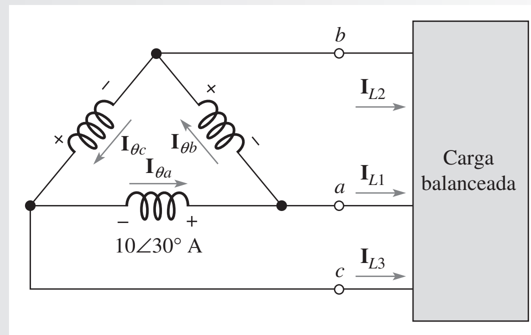
El generador trifásico conectado en Δ y representado en la figura 21-20 alimenta una carga balanceada de modo que la magnitud de la corriente de fase sea de 10 A. Cuando $\mathbf{I}_{\theta a} = 10 \angle 30°$ A, determine lo siguiente:

(a) Las expresiones polares para las demás corrientes de fase

(b) Las expresiones polares para cada una de las corrientes de línea

(c) El diagrama fasorial de corriente completo

▶ FIGURA 21–20



Solución **(a)** Las corrientes de fase están separadas por 120°, por consiguiente,

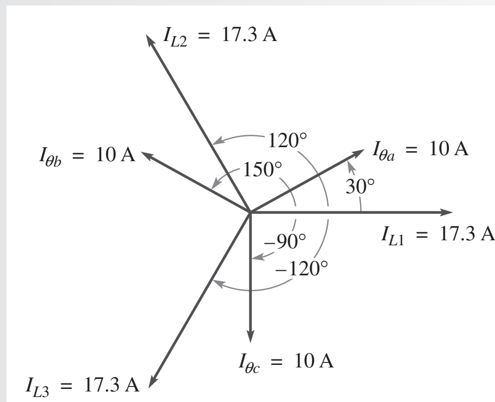
$$\mathbf{I}_{\theta b} = 10\angle(30° + 120°) = \mathbf{10\angle150°\ A}$$
$$\mathbf{I}_{\theta c} = 10\angle(30° - 120°) = \mathbf{10\angle{-90}°\ A}$$

(b) Las corrientes de línea están separadas de la corriente de fase más cercana por 30°; por consiguiente,

$$\mathbf{I}_{L1} = \sqrt{3}I_{\theta a}\angle(30° - 30°) = \mathbf{17.3\angle0°\ A}$$
$$\mathbf{I}_{L2} = \sqrt{3}I_{\theta b}\angle(150° - 30°) = \mathbf{17.3\angle120°\ A}$$
$$\mathbf{I}_{L3} = \sqrt{3}I_{\theta c}\angle(-90° - 30°) = \mathbf{17.3\angle{-120}°\ A}$$

(c) El diagrama fasorial se muestra en la figura 21-21.

▶ FIGURA 21–21



Problema relacionado Repita las partes (a) y (b) del ejemplo si $\mathbf{I}_{\theta a} = 8\angle60°$ A.

REPASO DE LA SECCIÓN 21-3

1. En un cierto generador conectado en Y de tres conductores, los voltajes de fase son de 1 kV. Determine la magnitud de los voltajes de línea.
2. En el generador conectado en Y mencionado en la pregunta 1, todas las corrientes de fase son de 5 A. ¿Cuáles son las magnitudes de la corriente de línea?
3. En un generador conectado en Δ, los voltajes de fase son de 240 V. ¿Cuáles son los voltajes de línea?
4. En un generador conectado en delta, una corriente de fase es de 2 A. Determine la magnitud de la corriente de línea.

21–4 ANÁLISIS DE FUENTE Y CARGA TRIFÁSICAS

En esta sección, se examinan cuatro tipos básicos de configuraciones de fuente y carga. De igual forma que para las conexiones de un generador, una carga puede ser o una configuración Y o una configuración Δ.

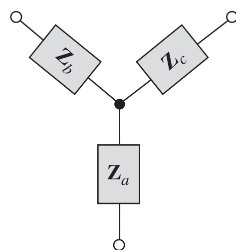
Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Analizar generadores trifásicos con cargas trifásicas**
  - Analizar la configuración Y-Y de fuente y carga
  - Analizar la configuración Y-Δ de fuente y carga
  - Analizar la configuración Δ-Y de fuente y carga
  - Analizar la configuración Δ-Δ de fuente y carga

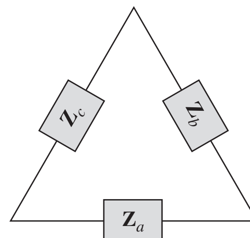
En la figura 21-22(a) se muestra una carga conectada en Y, y en la parte (b) aparece una carga conectada en Δ. Los bloques $\mathbf{Z}_a$, $\mathbf{Z}_b$ y $\mathbf{Z}_c$ representan las impedancias de carga, las cuales pueden ser resistivas, reactivas, o de ambos tipos.

Las cuatro configuraciones de fuente y carga son:

1. Fuente conectada en Y que alimenta una carga conectada en Y (sistema Y-Y)
2. Fuente conectada en Y que alimenta una carga conectada en Δ (sistema Y-Δ)
3. Fuente conectada en Δ que alimenta una carga conectada en Y (Δ-Y)
4. Fuente conectada en Δ que alimenta una carga conectada en Δ (sistema Δ-Δ)



(a) Carga conectada en Y



(b) Carga conectada en Δ

▲ FIGURA 21–22

Cargas trifásicas.

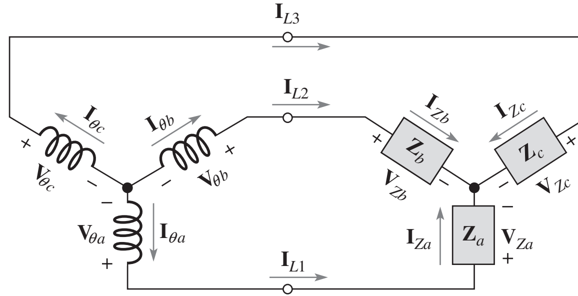
El sistema Y-Y

La figura 21-23 muestra una fuente conectada en Y que alimenta una carga conectada en Y. La carga puede ser una carga balanceada, tal como un motor trifásico donde $\mathbf{Z}_a = \mathbf{Z}_b = \mathbf{Z}_c$, o tres cargas monofásicas independientes donde, por ejemplo, $\mathbf{Z}_a$ es un circuito de iluminación, $\mathbf{Z}_b$ es un calentador, y $\mathbf{Z}_c$ es un compresor de aire acondicionado.

Una característica importante de una fuente conectada en Y es que están disponibles dos valores diferentes de voltaje trifásico: el voltaje de fase y el voltaje de línea. Por ejemplo, en el sistema de distribución de potencia estándar, se puede considerar un transformador trifásico como una fuente de voltaje trifásico que suministra 120 V y 208 V. Para utilizar un voltaje de fase de 120 V, las cargas se conectan en la configuración Y. Se utiliza una carga conectada en Δ para los voltajes de línea de 208 V.

▶ FIGURA 21–23

Fuente conectada en Y que alimenta una carga conectada en Y.



Observe en el sistema Y-Y de la figura 21-23 que la corriente de fase, la corriente de línea, y la corriente de carga son iguales en cada fase. Asimismo, cada voltaje de carga es igual al voltaje de fase correspondiente. Estas relaciones se expresan como sigue y son válidas para carga balanceada o desbalanceada.

Ecuación 21–5

$$I_\theta = I_L = I_Z$$

Ecuación 21–6

$$V_\theta = V_Z$$

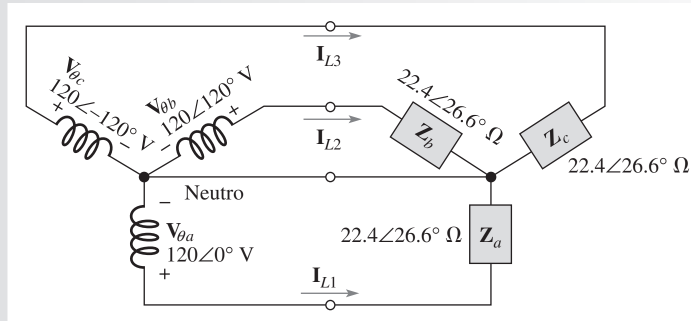
donde V_Z e I_Z son el voltaje y la corriente de carga, respectivamente.

Para una carga balanceada, todas las corrientes de fase son iguales y la corriente neutra es de cero. Para una carga desbalanceada, cada corriente de fase es diferente y la corriente neutra es, por consiguiente, distinta de cero.

EJEMPLO 21–4 En el sistema Y-Y de la figura 21-24, determine lo siguiente:

(a) Cada corriente de carga **(b)** Cada corriente de línea **(c)** Cada corriente de fase

(d) Corriente neutra **(e)** Cada voltaje de carga



▲ FIGURA 21–24

Solución Este sistema tiene una carga balanceada, $\mathbf{Z}_a = \mathbf{Z}_b = \mathbf{Z}_c = 22.4\angle 2\ 6.6^\circ\ \Omega$.

(a) Las corrientes de carga son

$$\mathbf{I}_{Za} = \frac{\mathbf{V}_{\theta a}}{\mathbf{Z}_a} = \frac{120\angle 0^\circ\ \text{V}}{22.4\angle 26.6^\circ\ \Omega} = \mathbf{5.36\angle -26.6^\circ\ A}$$

$$\mathbf{I}_{Zb} = \frac{\mathbf{V}_{\theta b}}{\mathbf{Z}_b} = \frac{120\angle 120^\circ\ \text{V}}{22.4\angle 26.6^\circ\ \Omega} = \mathbf{5.36\angle 93.4^\circ\ A}$$

$$\mathbf{I}_{Zc} = \frac{\mathbf{V}_{\theta c}}{\mathbf{Z}_c} = \frac{120\angle -120^\circ\ \text{V}}{22.4\angle 26.6^\circ\ \Omega} = \mathbf{5.36\angle -147^\circ\ A}$$

(b) Las corrientes de línea son

$$\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{5.36\angle -26.6^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{L2} = \mathbf{5.36\angle 93.4^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{L3} = \mathbf{5.36\angle -147^\circ\ A}$$

(c) Las corrientes de fase son

$$\mathbf{I}_{\theta a} = \mathbf{5.36\angle -26.6^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{\theta b} = \mathbf{5.36\angle 93.4^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{\theta c} = \mathbf{5.36\angle -147^\circ\ A}$$

(d) $\mathbf{I}_{\text{neutra}} = \mathbf{I}_{Za} + \mathbf{I}_{Zb} + \mathbf{I}_{Zc}$
$= 5.36\angle -26.6^\circ\ \text{A} + 5.36\angle 93.4^\circ\ \text{A} + 5.36\angle -147^\circ\ \text{A}$
$= (4.80\ \text{A} - j2.40\ \text{A}) + (-0.33\ \text{A} + j5.35\ \text{A}) + (-4.47\ \text{A} - j2.95\ \text{A}) = \mathbf{0\ A}$

Si las impedancias de carga no fueran iguales (carga desbalanceada), la corriente neutra tendría un valor distinto de cero.

(e) Los voltajes de carga son iguales a los voltajes de fase de fuente correspondientes,

$$\mathbf{V}_{Za} = \mathbf{120\angle 0^\circ\ V}$$
$$\mathbf{V}_{Zb} = \mathbf{120\angle 120^\circ\ V}$$
$$\mathbf{V}_{Zc} = \mathbf{120\angle -120^\circ\ V}$$

Problema relacionado Determine la corriente neutra si $\mathbf{Z}_a$ y $\mathbf{Z}_b$ son las mismas de la figura 21-24, pero $\mathbf{Z}_c = 50\angle 26.6^\circ\ \Omega$.

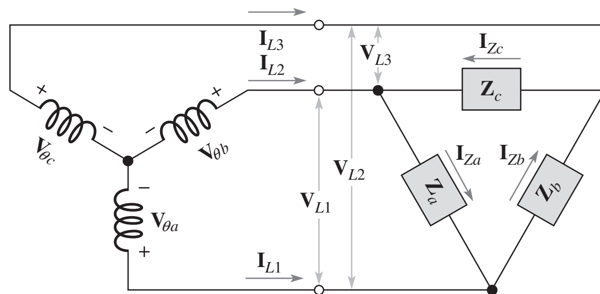
El sistema Y-Δ

La figura 21-25 muestra una fuente conectada en Y que alimenta una carga conectada en Δ. Una importante característica de esta configuración es que cada fase de la carga tiene el voltaje de línea completo a través de ella.

$$V_Z = V_L \qquad \textbf{Ecuación 21–7}$$

Las corrientes de línea son iguales a las corrientes de fase correspondientes, y cada corriente de línea se divide en dos corrientes de carga, como se indica. Para una carga balanceada ($\mathbf{Z}_a = \mathbf{Z}_b = \mathbf{Z}_c$), la expresión para la corriente en cada carga es

$$I_L = \sqrt{3}I_Z \qquad \textbf{Ecuación 21–8}$$

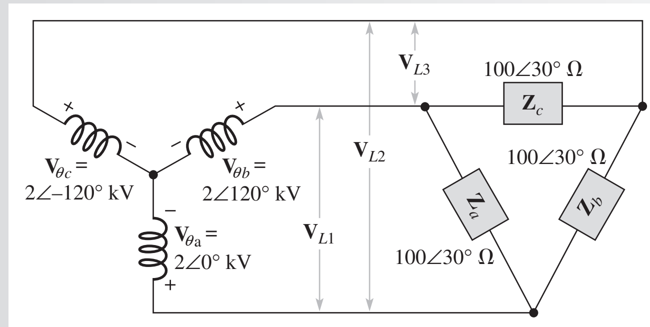


▲ **FIGURA 21–25**

Fuente conectada en Y que alimenta una carga conectada en Δ.

EJEMPLO 21–5 Determine los voltajes de carga y las corrientes de carga en la figura 21-26, y muestre su relación en un diagrama fasorial.

▶ FIGURA 21–26



Solución Con $V_L = \sqrt{3}V_\theta$ (ecuación 21-2) y el hecho de que hay 30° entre cada voltaje de línea y el voltaje de fase más cercano, los voltajes de carga son

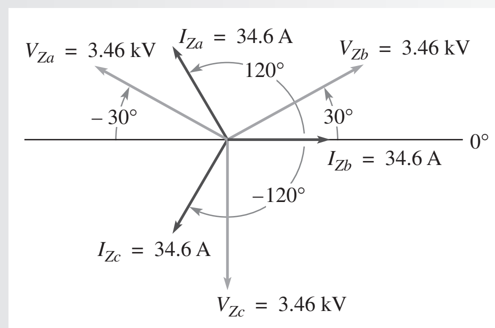
$$\mathbf{V}_{Za} = \mathbf{V}_{L1} = 2\sqrt{3}\angle 150^\circ\text{ kV} = \mathbf{3.46\angle 150^\circ\ kV}$$
$$\mathbf{V}_{Zb} = \mathbf{V}_{L2} = 2\sqrt{3}\angle 30^\circ\text{ kV} = \mathbf{3.46\angle 30^\circ\ kV}$$
$$\mathbf{V}_{Zc} = \mathbf{V}_{L3} = 2\sqrt{3}\angle -90^\circ\text{ kV} = \mathbf{3.46\angle -90^\circ\ kV}$$

Las corrientes de carga son

$$\mathbf{I}_{Za} = \frac{\mathbf{V}_{Za}}{\mathbf{Z}_a} = \frac{3.46\angle 150^\circ\text{ kV}}{100\angle 30^\circ\ \Omega} = \mathbf{34.6\angle 120^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{Zb} = \frac{\mathbf{V}_{Zb}}{\mathbf{Z}_b} = \frac{3.46\angle 30^\circ\text{ kV}}{100\angle 30^\circ\ \Omega} = \mathbf{34.6\angle 0^\circ\ A}$$
$$\mathbf{I}_{Zc} = \frac{\mathbf{V}_{Zc}}{\mathbf{Z}_c} = \frac{3.46\angle -90^\circ\text{ kV}}{100\angle 30^\circ\ \Omega} = \mathbf{34.6\angle -120^\circ\ A}$$

El diagrama fasorial se muestra en la figura 21-27.

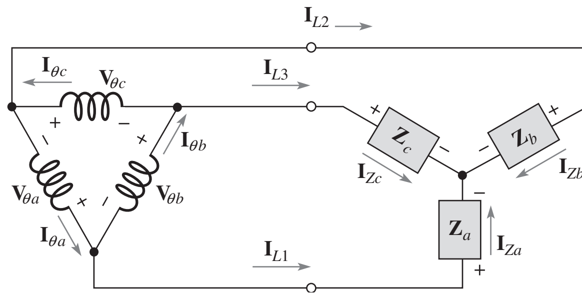
▶ FIGURA 21–27



Problema relacionado Determine las corrientes de carga en la figura 21-26 si los voltajes de fase tienen magnitud de 240 V.

El sistema Δ-Y

La figura 21-28 muestra una fuente conectada en Δ que alimenta una carga balanceada conectada en Y. Al examinar la figura se puede advertir que los voltajes de línea son iguales a los voltajes de fase correspondientes de la fuente. Además, cada voltaje de fase es igual a la diferencia de los voltajes de carga correspondientes, como puede observarse a partir de las polaridades.



▲ FIGURA 21–28

Fuente conectada en Δ que alimenta una carga conectada en Y.

Cada corriente de carga es igual a la corriente de línea correspondiente. La suma de las corrientes de carga es cero porque la carga está balanceada; así, no se requiere un retorno neutro.

La relación entre los voltajes de carga y los voltajes de fase correspondientes (y los voltajes de línea) es

$$V_\theta = \sqrt{3}V_Z$$ **Ecuación 21–9**

Las corrientes de línea y las corrientes de carga correspondientes son iguales, y para una carga balanceada, la suma de las corrientes de carga es cero.

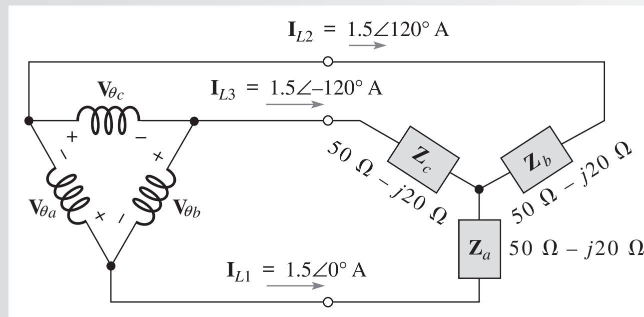
$$\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_Z$$ **Ecuación 21–10**

Como puede observarse en la figura 21-28, cada corriente de línea es la diferencia de las dos corrientes de fase.

$$\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{I}_{\theta a} - \mathbf{I}_{\theta b}$$
$$\mathbf{I}_{L2} = \mathbf{I}_{\theta c} - \mathbf{I}_{\theta a}$$
$$\mathbf{I}_{L3} = \mathbf{I}_{\theta b} - \mathbf{I}_{\theta c}$$

EJEMPLO 21–6 Determine las corrientes y los voltajes en la carga balanceada y la magnitud de los voltajes de línea en la figura 21-29.

▶ FIGURA 21–29



Solución Las corrientes de carga son iguales a las corrientes de línea especificadas.

$$\mathbf{I}_{Za} = \mathbf{I}_{L1} = \mathbf{1.5\angle 0°\ A}$$
$$\mathbf{I}_{Zb} = \mathbf{I}_{L2} = \mathbf{1.5\angle 120°\ A}$$
$$\mathbf{I}_{Zc} = \mathbf{I}_{L3} = \mathbf{1.5\angle -120°\ A}$$

Los voltajes de carga son

$$\mathbf{V}_{Za} = \mathbf{I}_{Za}\mathbf{Z}_a$$
$$= (1.5\angle 0°\ \text{A})(50\ \Omega - j20\ \Omega)$$
$$= (1.5\angle 0°\ \text{A})(53.9\angle -21.8°\ \Omega) = \mathbf{80.9\angle -21.8°\ V}$$

$$\mathbf{V}_{Zb} = \mathbf{I}_{Zb}\mathbf{Z}_b$$
$$= (1.5\angle 120° \text{ A})(53.9\angle -21.8° \ \Omega) = \mathbf{80.9\angle 98.2° \ V}$$
$$\mathbf{V}_{Zc} = \mathbf{I}_{Zc}\mathbf{Z}_c$$
$$= (1.5\angle -120° \text{ A})(53.9\angle -21.8° \ \Omega) = \mathbf{80.9\angle -142° \ V}$$

La magnitud de los voltajes de línea es

$$V_L = V_\theta = \sqrt{3}V_Z = \sqrt{3}(80.9 \text{ V}) = \mathbf{140 \ V}$$

Problema relacionado Si las magnitudes de las corrientes de línea son de 1 A, ¿cuáles son las corrientes de carga?

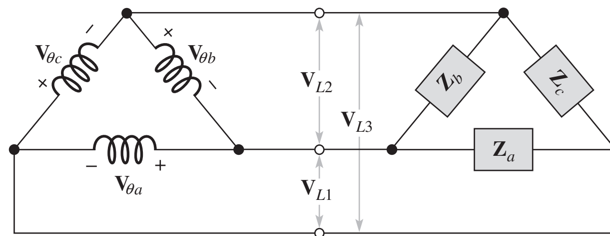
El sistema Δ-Δ

La figura 21-30 muestra una fuente conectada en Δ que alimenta una carga conectada en Δ. Observe que el voltaje de carga, el voltaje de línea, y el voltaje de fase de la fuente son iguales para una fase dada.

$$V_{\theta a} = V_{L1} = V_{Za}$$
$$V_{\theta b} = V_{L2} = V_{Zb}$$
$$V_{\theta c} = V_{L3} = V_{Zc}$$

▶ **FIGURA 21–30**

Fuente conectada en Δ que alimenta una carga conectada en Δ.



Desde luego, cuando la carga está balanceada, todos los voltajes son iguales, y se puede escribir una expresión general

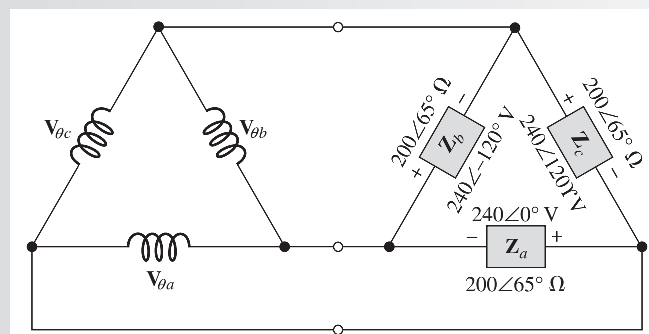
Ecuación 21–11
$$V_\theta = V_L = V_Z$$

Para una carga balanceada y voltajes de fase de fuente iguales, se puede demostrar que

Ecuación 21–12
$$I_L = \sqrt{3}I_Z$$

EJEMPLO 21–7 Determine la magnitud de las corrientes de carga y de las corrientes de línea en la figura 21-31.

▶ **FIGURA 21–31**



Solución

$$V_{Za} = V_{Zb} = V_{Zc} = 240\text{ V}$$

La magnitud de las corrientes de carga es

$$I_{Za} = I_{Zb} = I_{Zc} = \frac{V_{Za}}{Z_a} = \frac{240\text{ V}}{200\ \Omega} = \mathbf{1.20\ A}$$

La magnitud de las corrientes de línea es

$$I_L = \sqrt{3}I_Z = \sqrt{3}(1.20\text{ A}) = \mathbf{2.08\ A}$$

Problema relacionado Determine la magnitud de las corrientes de carga y de línea mostradas en la figura 21-31 si la magnitud de los voltajes de carga es de 120 V y las impedancias son de 600 Ω.

REPASO DE LA SECCIÓN 21-4

1. **Enumere los cuatro tipos de configuraciones trifásicas de fuente y carga.**
2. **En cierto sistema Y-Y, cada una de las corrientes de fase de fuente tiene magnitud de 3.5 A. ¿Cuál es la magnitud de cada corriente de carga para una condición de carga balanceada?**
3. **En un sistema Y-Δ dado, $V_L = 220$ V. Determine V_Z.**
4. **Determine los voltajes de línea en un sistema Δ-Y balanceado cuando la magnitud de los voltajes de fase de fuente es de 60 V.**
5. **Determine la magnitud de las corrientes de carga en un sistema Δ-Δ balanceado que tiene una magnitud de corriente de línea de 3.2 A.**

21–5 POTENCIA TRIFÁSICA

En esta sección, se estudia la potencia en sistemas trifásicos y se introducen métodos de medición de potencia.

Después de completar esta sección, usted debe ser capaz de:

- **Examinar mediciones de potencia en sistemas trifásicos**
  - Describir el método de tres wattímetros
  - Describir el método de dos wattímetros

Cada fase de una carga trifásica balanceada tiene una cantidad igual de potencia. Por consiguiente, la potencia real total existente en la carga es tres veces la potencia presente en cada fase de la carga.

$$P_{L(tot)} = 3V_ZI_Z\cos\theta \qquad \textbf{Ecuación 21–13}$$

donde V_Z e I_Z son el voltaje y la corriente asociados con cada fase de la carga, y cos θ es el factor de potencia.

Recuerde que en un sistema conectado en Y balanceado, el voltaje de línea y la corriente de línea eran

$$V_L = \sqrt{3}V_Z \qquad \text{y} \qquad I_L = I_Z$$

y en un sistema conectado en Δ balanceado, el voltaje de línea y la corriente de línea eran

$$V_L = V_Z \qquad \text{y} \qquad I_L = \sqrt{3}I_Z$$

Cuando cualesquiera de estas relaciones se sustituyen en la ecuación 21-13, la potencia real total tanto para sistemas conectados en Y como para sistemas conectados en Δ es

Ecuación 21–14

$$P_{L(tot)} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$$

EJEMPLO 21–8 En cierta carga balanceada conectada en Δ, los voltajes de línea son de 250 V y las impedancias de 50 ∠ 30° Ω. Determine la potencia total suministrada a la carga.

Solución En un sistema conectado en Δ, $V_Z = V_L$ e $I_L = \div 3I_Z$. Las magnitudes de la corriente de carga son

$$I_Z = \frac{V_Z}{Z} = \frac{250\text{ V}}{50\ \Omega} = 5\text{ A}$$

y

$$I_L = \sqrt{3}I_Z = \sqrt{3}(5\text{ A}) = 8.66\text{ A}$$

El factor de potencia es

$$\cos\theta = \cos 30^\circ = 0.866$$

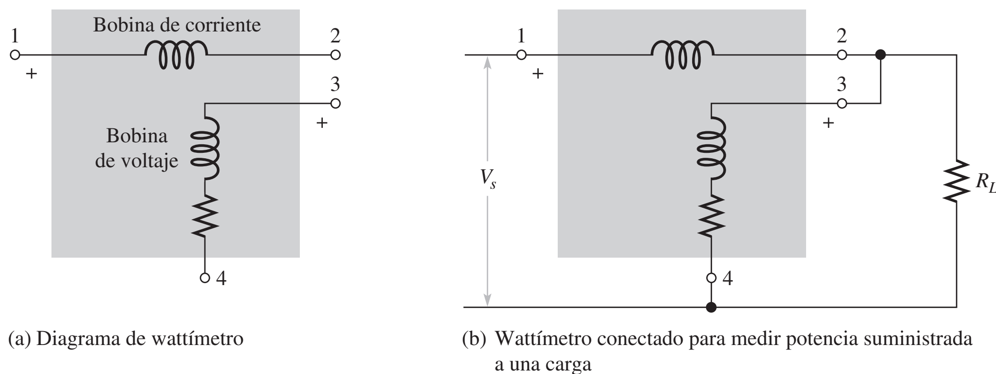
La potencia total suministrada a la carga es

$$P_{L(tot)} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta = \sqrt{3}(250\text{ V})(8.66\text{ A})(0.866) = \mathbf{3.25\ kW}$$

Problema relacionado Determine la potencia total suministrada a la carga si $V_L = 120$ V y $\mathbf{Z} = 100 \angle 30^\circ\ \Omega$.

Medición de potencia

En los sistemas trifásicos, la potencia se mide con wattímetros. El wattímetro utiliza un movimiento del tipo electrodinamómetro básico compuesto por dos bobinas. Una bobina se usa para medir la corriente, y la otra para medir el voltaje. La figura 21-32 ilustra el diagrama esquemático de un wattímetro básico y las conexiones para medir potencia en una carga. El resistor dispuesto en serie con la bobina de voltaje limita la corriente a través de la bobina a una pequeña cantidad que es proporcional al voltaje presente entre las terminales de la bobina.

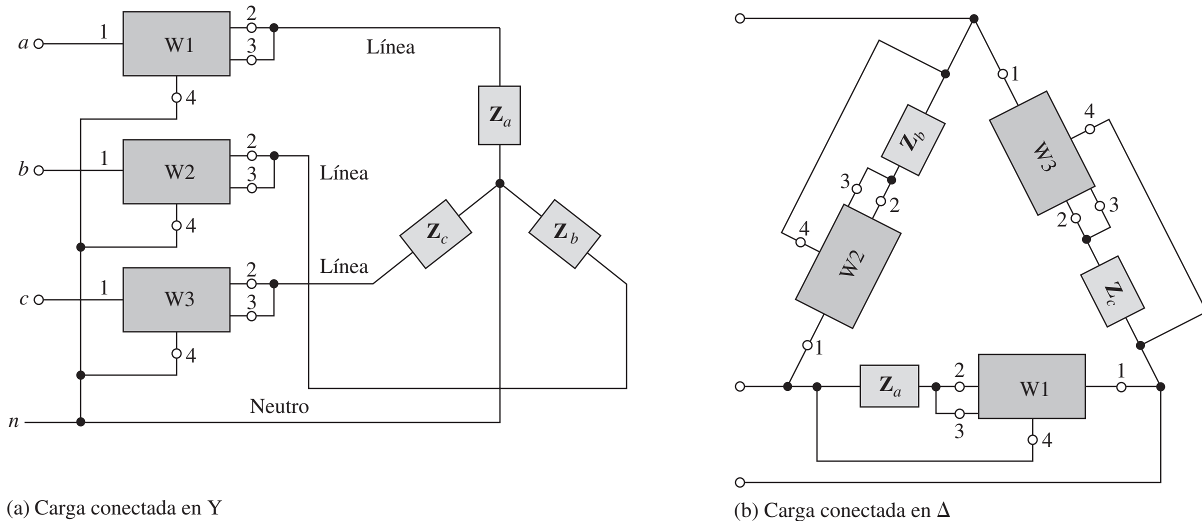


(a) Diagrama de wattímetro

(b) Wattímetro conectado para medir potencia suministrada a una carga

▲ **FIGURA 21–32**

Método de tres wattímetros En una carga trifásica balanceada o desbalanceada de tipo Y o de tipo Δ se puede medir fácilmente la potencia utilizando tres wattímetros conectados como indica la figura 21-33. Este procedimiento se denomina ocasionalmente *método de tres wattímetros*.



▲ **FIGURA 21–33**

Método de tres wattímetros para medir potencia.

La potencia total se determina sumando las tres lecturas de wattímetro.

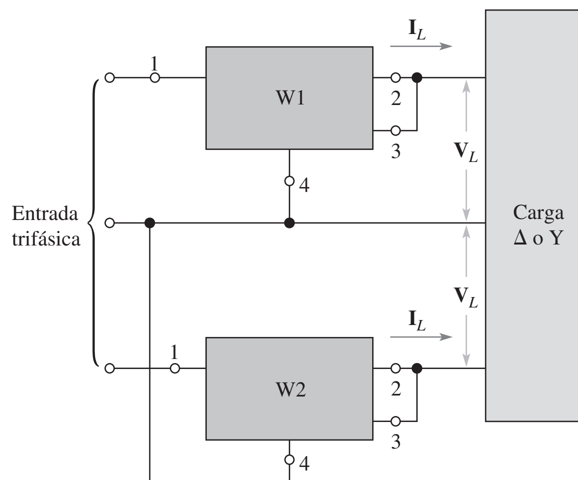
$$P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3$$ **Ecuación 21–15**

Si la carga está balanceada, la potencia total es simplemente tres veces la lectura mostrada por cualquier wattímetro.

En muchas cargas trifásicas, sobre todo en la configuración Δ, es difícil conectar un wattímetro de modo que la bobina de voltaje quede a través de la carga o que la bobina de corriente quede en serie con la carga debido a la falta de acceso a los puntos que están dentro de la carga.

Método de dos wattímetros Otro método de medición de potencia trifásica utiliza sólo dos wattímetros. Las conexiones utilizadas para aplicar este método se muestran en la figura 21-34. Observe que la bobina de voltaje de cada wattímetro está conectada a través del voltaje de línea y que la bobina de corriente tiene una corriente de línea a través de ella. Se puede demostrar que la suma algebraica de las dos lecturas de wattímetro es igual a la potencia total presente en la carga conectada en Y o en Δ.

$$P_{tot} = P_1 \pm P_2$$ **Ecuación 21–16**



◀ **FIGURA 21–34**

Método de dos wattímetros.

REPASO DE LA SECCIÓN 21-5

1. $V_L = 30$ V, $I_L = 1.2$ A, y el factor de potencia es de 0.257. ¿Cuál es la potencia total en una carga balanceada conectada en Y? ¿En una carga balanceada conectada en Δ?
2. Tres wattímetros conectados para medir la potencia en cierta carga balanceada indican un total de 2678 W. ¿Cuánta potencia mide cada medidor?

RESUMEN

- Un generador trifásico simple se compone de tres espiras conductoras separadas por 120°.
- Tres ventajas de los sistemas trifásicos sobre los monofásicos son una sección transversal de cobre más pequeña para la misma potencia suministrada a la carga, una potencia constante suministrada a la carga, y un campo magnético rotatorio constante.
- En un generador conectado en Y, $I_L = I_\theta$ y $V_L = \sqrt{3}V_\theta$.
- En un generador conectado en Y, hay una diferencia de 30° entre cada voltaje de línea y el voltaje de fase más cercano.
- En un generador conectado en Δ, $V_L = V_\theta$ y $I_L = \sqrt{3}I_\theta$.
- En un generador conectado en Δ, hay una diferencia de 30° entre cada corriente de línea y la corriente de fase más cercana.
- Una carga balanceada es una carga donde todas las impedancias son iguales.
- En una carga trifásica la potencia se mide aplicando o el método de tres wattímetros o el método de dos wattímetros.

TÉRMINOS CLAVE

Los términos clave y otros términos en negritas se definen en el glosario incluido al final del libro.

Carga balanceada Condición en la que todas las corrientes de carga son iguales y la corriente neutra es de cero.

Corriente de fase (I_θ) Corriente a través del devanado de un generador.

Corriente de línea (I_L) Corriente a través de una línea que alimenta una carga.

Devanado de campo Es el devanado en el rotor de un generador de ca.

Estator Es la parte externa estacionaria de un generador o motor.

Rotor Ensamble rotatorio en un generador o motor.

Voltaje de fase (V_θ) Es el voltaje entre el devanado de un generador.

Voltaje de línea (V_L) Voltaje entre las líneas que alimentan una carga.

FÓRMULAS

Generador en Y

21–1 $I_L = I_\theta$

21–2 $V_L = \sqrt{3}V_\theta$

Generador en Δ

21–3 $V_L = V_\theta$

21–4 $I_L = \sqrt{3}I_\theta$

Sistema Y-Y

21–5 $I_\theta = I_L = I_Z$

21–6 $V_\theta = V_Z$

Sistema Y-Δ

21–7 $V_Z = V_L$

21–8 $I_L = \sqrt{3}I_Z$

Sistema Δ a Y

21–9 $V_\theta = \sqrt{3}V_Z$

21–10 $I_L = I_Z$

Sistema Δ-Δ

21–11 $V_\theta = V_L = V_Z$

21–12 $I_L = \sqrt{3}I_Z$

Potencia trifásica

21–13 $P_{L(tot)} = 3V_Z I_Z \cos\theta$

21–14 $P_{L(tot)} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$

Método de tres wattímetros

21–15 $P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3$

Método de dos wattímetros

21–16 $P_{tot} = P_1 \pm P_2$

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas se encuentran al final del capítulo.

1. En un sistema trifásico, los voltajes están separados en

(a) 90° **(b)** 30° **(c)** 180° **(d)** 120°

2. El término *jaula de ardilla* se aplica a un tipo de

(a) generador de ca trifásico
(b) generador de ca monofásico
(c) motor de ca trifásico
(d) motor de cd

3. Dos partes importantes de un generador de ca son

(a) rotor y estator **(b)** rotor y estabilizador
(c) regulador y anillo rozante **(d)** imanes y escobillas

4. Las ventajas de un sistema trifásico sobre uno monofásico son

(a) área de sección transversal más pequeña para los conductores de cobre
(b) velocidad del rotor más lenta
(c) potencia constante
(d) menor probabilidad de sobrecalentamiento
(e) tanto (a) como (c)
(f) tanto (b) como (c)

5. La corriente de fase producida por un generador conectado en Y de 240 V es de 12 A. La corriente de línea correspondiente es de

(a) 36 A **(b)** 4 A **(c)** 12 A **(d)** 6 A

6. Cierto generador conectado en Δ produce voltajes de fase de 30 V. La magnitud de los voltajes de línea es de

(a) 10 V **(b)** 30 V **(c)** 90 V **(d)** ninguno de estos valores

7. Un sistema Δ-Δ produce corrientes de fase de 5 A. Las corrientes de línea son de

(a) 5 A **(b)** 15 A **(c)** 8.66 A **(d)** 2.87 A

8. Un sistema Y-Y produce corrientes de fase de 15 A. Cada corriente de línea y carga es de

(a) 26 A **(b)** 8.66 A **(c)** 5 A **(d)** 15 A

9. Si los voltajes de fase de la fuente de un sistema Δ-Y son de 220 V, la magnitud de los voltajes de carga es de

(a) 220 V **(b)** 381 V **(c)** 127 V **(d)** 73.3 V

PROBLEMAS

Los problemas más difíciles se indican con un asterisco (*).
Las respuestas a los problemas de número impar se encuentran al final del libro.

SECCIÓN 21–1 Introducción a máquinas trifásicas

1. La salida de un generador de ca tiene un valor máximo de 250 V. ¿A qué ángulo el valor instantáneo es igual a 75 V?

2. Cierto generador trifásico de dos polos tiene una velocidad de rotación de 60 rpm. ¿Cuál es la frecuencia de cada voltaje producido por este generador? ¿Cuál es el ángulo de fase entre cada voltaje?

SECCIÓN 21–2 Generadores en aplicaciones de potencia

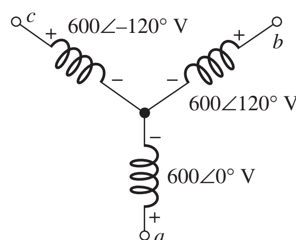
3. Un generador monofásico alimenta una carga compuesta por un resistor de 200 Ω y un capacitor con reactancia de 175 Ω. El generador produce un voltaje de 100 V. Determine la magnitud de la corriente de carga.

4. Determine la fase de la corriente de carga con respecto al voltaje del generador del problema 3.

5. Una carga trifásica desbalanceada en un sistema de cuatro hilos tiene corrientes de $2\angle 20^\circ$ A, $3\angle 140^\circ$, y $1.5\angle -100^\circ$ A. Determine la corriente en la línea neutra.

SECCIÓN 21–3 Tipos de generadores trifásicos

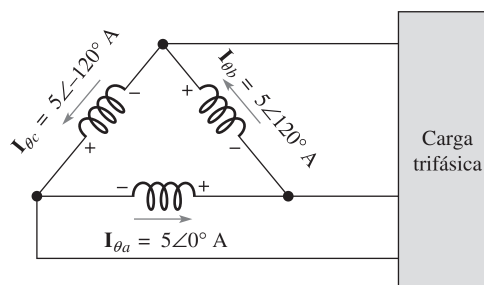
6. Determine los voltajes de línea en la figura 21-35.



▲ **FIGURA 21–35**

7. Determine las corrientes de línea en la figura 21-36.

8. Desarrolle un diagrama fasorial de corriente completo para la figura 21-36.

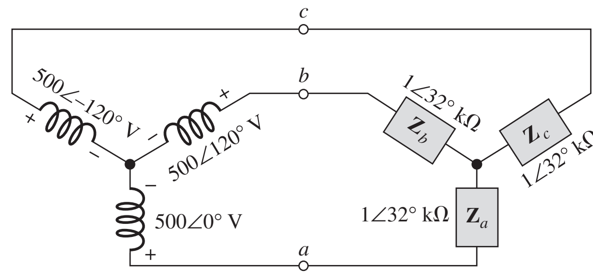


▲ **FIGURA 21–36**

SECCIÓN 21–4 Análisis de fuente y carga trifásica

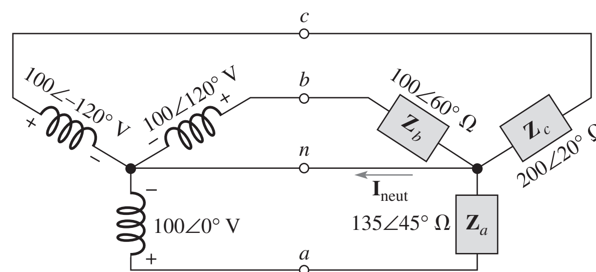
9. Determine las siguientes cantidades para el sistema Y-Y de la figura 21-37:

(a) Los voltajes de línea **(b)** Las corrientes de fase **(c)** Las corrientes de línea
(d) Las corrientes de carga **(e)** Los voltajes de carga



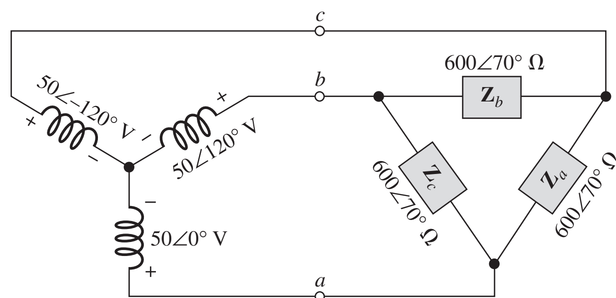
▲ FIGURA 21–37

10. Repita el problema 9 para el sistema de la figura 21-38, y también determine la corriente neutra.



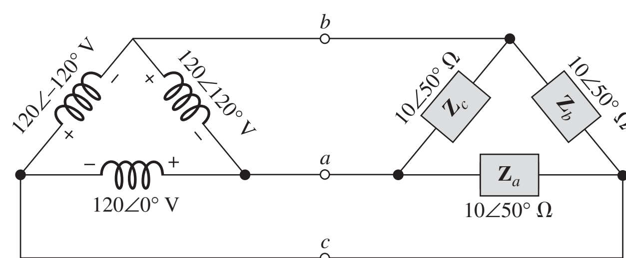
▲ FIGURA 21–38

11. Repita el problema 9 para el sistema de la figura 21-39.



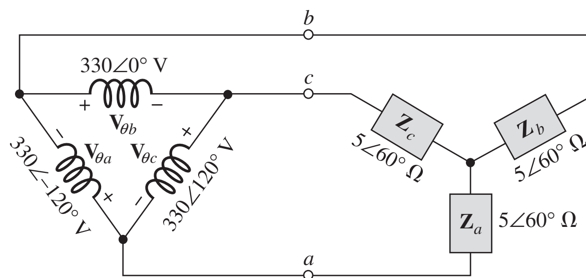
▲ FIGURA 21–39

12. Repita el problema 9 para el sistema de la figura 21-40.



▲ FIGURA 21–40

13. Determine los voltajes de línea y las corrientes de carga para el sistema de la figura 21-41.

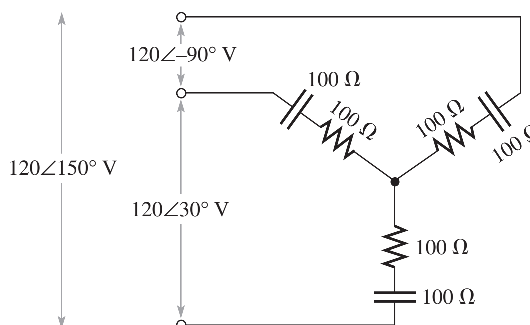


▲ FIGURA 21–41

SECCIÓN 21–5 Potencia trifásica

14. La potencia en cada fase de un sistema trifásico balanceado es de 1200 W. ¿Cuál es la potencia total?
15. Determine la potencia suministrada a la carga en las figuras 21-37 a 21-41.
16. Determine la potencia total suministrada a la carga en la figura 21-42.

▶ FIGURA 21–42



*17. Utilice el método de tres wattímetros para medir el sistema de la figura 21-42. ¿Cuánta potencia indica cada wattímetro?

*18. Repita el problema 17 empleando el método de dos wattímetros.

RESPUESTAS

REPASOS DE SECCIÓN

SECCIÓN 21–1 Introducción a máquinas trifásicas

1. En generadores de ca, se induce un voltaje sinusoidal cuando se hace girar una espira conductora en un campo magnético a velocidad constante.
2. Tres devanados de armadura.

SECCIÓN 21–2 Generadores en aplicaciones de potencia

1. Las ventajas de los sistemas polifásicos son: menos sección transversal de cobre para conducir corriente; potencia constante suministrada a la carga; y campo magnético rotatorio constante.
2. Potencia constante.
3. Campo magnético constante.

SECCIÓN 21–3 Tipos de generadores trifásicos

1. $V_L = 1.73\text{ kV}$
2. $I_L = 5\text{ A}$

3. $V_L = 240$ V
4. $I_L = 3.46$ A

SECCIÓN 21–4 Análisis de fuente y carga trifásicas

1. Las configuraciones de fuente y carga son Y-Y, Y-Δ, Δ-Y, y Δ-Δ.
2. $I_L = 3.5$ A
3. $V_Z = 220$ V
4. $V_L = 60$ V
5. $I_Z = 1.85$ A

SECCIÓN 21–5 Potencia trifásica

1. $P_Y = 16.0$ W; $P_\Delta = 16.0$ W
2. $P = 893$ W

PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS EJEMPLOS

21–1 4.8 A totales para monofásico; 2.4 A totales para trifásico.
21–2 208 V
21–3 **(a)** $\mathbf{I}_{\theta b} = 8\angle 180°$ A, $\mathbf{I}_{\theta c} = 8\angle -60°$ A
(b) $\mathbf{I}_{L1} = 13.9\angle 30°$ A, $\mathbf{I}_{L2} = 13.9\angle 150°$ A, $\mathbf{I}_{L3} = 13.9\angle -90°$ A
21–4 $2.96\angle 33.4°$ A
21–5 $\mathbf{I}_{Za} = 4.16\angle 120°$ A, $\mathbf{I}_{Zb} = 4.16\angle 0°$, $\mathbf{I}_{Zc} = 4.16\angle -120°$ A
21–6 $\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{I}_{Za} = 1\angle 0°$ A, $\mathbf{I}_{L2} = \mathbf{I}_{Zb} = 1\angle 120°$ A, $\mathbf{I}_{L3} = \mathbf{I}_{Zc} = 1\angle -120°$ A
21–7 $I_Z = 200$ mA, $I_L = 346$ mA
21–8 374 W

AUTOEVALUACIÓN

1. (d) **2.** (c) **3.** (a) **4.** (e) **5.** (c) **6.** (b) **7.** (c)
8. (d) **9.** (c)

Apéndice A

TABLA DE VALORES PARA RESISTORES ESTÁNDAR

Tolerancia de resistencia (±%)

0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%
10.0	10.0	10	10	14.7	14.7	—	—	21.5	21.5	—	—	31.6	31.6	—	—	46.4	46.4	—	—	68.1	68.1	68	68
10.1	—	—	—	14.9	—	—	—	21.8	—	—	—	32.0	—	—	—	47.0	—	47	47	69.0	—	—	—
10.2	10.2	—	—	15.0	15.0	15	15	22.1	22.1	22	22	32.4	32.4	—	—	47.5	47.5	—	—	69.8	69.8	—	—
10.4	—	—	—	15.2	—	—	—	22.3	—	—	—	32.8	—	—	—	48.1	—	—	—	70.6	—	—	
10.5	10.5	—	—	15.4	15.4	—	—	22.6	22.6	—	—	33.2	33.2	33	33	48.7	48.7	—	—	71.5	71.5	—	—
10.6	—	—	—	15.6	—	—	—	22.9	—	—	—	33.6	—	—	—	49.3	—	—	—	72.3	—	—	—
10.7	10.7	—	—	15.8	15.8	—	—	23.2	23.2	—	—	34.0	34.0	—	—	49.9	49.9	—	—	73.2	73.2	—	—
10.9	—	—	—	16.0	—	16	—	23.4	—	—	—	34.4	—	—	—	50.5	—	—	—	74.1	—	—	—
11.0	11.0	11	—	16.2	16.2	—	—	23.7	23.7	—	—	34.8	34.8	—	—	51.1	51.1	51	—	75.0	75.0	75	—
11.1	—	—	—	16.4	—	—	—	24.0	—	24	—	35.2	—	—	—	51.7	—	—	—	75.9	—	—	—
11.3	11.3	—	—	16.5	16.5	—	—	24.3	24.3	—	—	35.7	35.7	—	—	52.3	52.3	—	—	76.8	76.8	—	—
11.4	—	—	—	16.7	—	—	—	24.6	—	—	—	36.1	—	36	—	53.0	—	—	—	77.7	—	—	—
11.5	11.5	—	—	16.9	16.9	—	—	24.9	24.9	—	—	36.5	36.5	—	—	53.6	53.6	—	—	78.7	78.7	—	—
11.7	—	—	—	17.2	—	—	—	25.2	—	—	—	37.0	—	—	—	54.2	—	—	—	79.6	—	—	—
11.8	11.8	—	—	17.4	17.4	—	—	25.5	25.5	—	—	37.4	37.4	—	—	54.9	54.9	—	—	80.6	80.6	—	—
12.0	—	12	12	17.6	—	—	—	25.8	—	—	—	37.9	—	—	—	56.2	—	—	—	81.6	—	—	—
12.1	12.1	—	—	17.8	17.8	—	—	26.1	26.1	—	—	38.3	38.3	—	—	56.6	56.6	56	56	82.5	82.5	82	82
12.3	—	—	—	18.0	—	18	18	26.4	—	—	—	38.8	—	—	—	56.9	—	—	—	83.5	—	—	—
12.4	12.4	—	—	18.2	18.2	—	—	26.7	26.7	—	—	39.2	39.2	39	39	57.6	57.6	—	—	84.5	84.5	—	—
12.6	—	—	—	18.4	—	—	—	27.1	—	27	27	39.7	—	—	—	58.3	—	—	—	85.6	—	—	—
12.7	12.7	—	—	18.7	18.7	—	—	27.4	27.4	—	—	40.2	40.2	—	—	59.0	59.0	—	—	86.6	86.6	—	—
12.9	—	—	—	18.9	—	—	—	27.7	—	—	—	40.7	—	—	—	59.7	—	—	—	87.6	—	—	—
13.0	13.0	13	—	19.1	19.1	—	—	28.0	28.0	—	—	41.2	41.2	—	—	60.4	60.4	—	—	88.7	88.7	—	—
13.2	—	—	—	19.3	—	—	—	28.4	—	—	—	41.7	—	—	—	61.2	—	—	—	89.8	—	—	—
13.3	13.3	—	—	19.6	19.6	—	—	28.7	28.7	—	—	42.2	42.2	—	—	61.9	61.9	62	—	90.9	90.9	91	—
13.5	—	—	—	19.8	—	—	—	29.1	—	—	—	42.7	—	—	—	62.6	—	—	—	92.0	—	—	—
13.7	13.7	—	—	20.0	20.0	20	—	29.4	29.4	—	—	43.2	43.2	43	—	63.4	63.4	—	—	93.1	93.1	—	—
13.8	—	—	—	20.3	—	—	—	29.8	—	—	—	43.7	—	—	—	64.2	—	—	—	94.2	—	—	—
14.0	14.0	—	—	20.5	20.5	—	—	30.1	30.1	30	—	44.2	44.2	—	—	64.9	64.9	—	—	95.3	95.3	—	—
14.2	—	—	—	20.8	—	—	—	30.5	—	—	—	44.8	—	—	—	65.7	—	—	—	96.5	—	—	—
14.3	14.3	—	—	21.0	21.0	—	—	30.9	30.9	—	—	45.3	45.3	—	—	66.5	66.5	—	—	97.6	97.6	—	—
14.5	—	—	—	21.3	—	—	—	31.2	—	—	—	45.9	—	—	—	67.3	—	—	—	98.8	—	—	—

NOTA: Estos valores están disponibles generalmente en múltiplos de 0.1, 1, 10, 100, 1 k y 1 M.

DERIVACIONES

Apéndice B

Ecuación 7-3 Voltaje de salida de puente de medición de temperatura

En equilibrio $V_{SAL} = 0$, y el valor de todas las resistencias es R. Para un pequeño desequilibrio:

$$V_B = \frac{V_S}{2} \text{ y } V_A = \left(\frac{R}{2R + \Delta R_{TERM}}\right)V_S$$

$$\Delta V_{SAL} = V_B - V_A = \frac{V_S}{2} - \left(\frac{R}{2R + \Delta R_{TERM}}\right)V_S$$

$$= \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{2R + \Delta R_{TERM}}\right)V_S$$

$$= \left(\frac{2R + \Delta R_{TERM} - 2R}{2(2R + \Delta R_{TERM})}\right)V_S$$

$$= \left(\frac{\Delta R_{TERM}}{4R + 2\Delta R_{TERM}}\right)V_S$$

Supongamos que $2\Delta R_{TERM} << 4R$, entonces

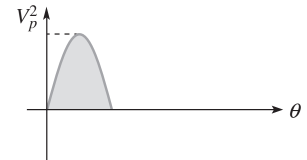
$$\Delta V_{SAL} \cong \left(\frac{\Delta R_{TERM}}{4R}\right)V_S = \Delta R_{TERM}\left(\frac{V_S}{4R}\right)$$

Ecuación 11-6 Valor (efectivo) RMS de una onda seno

La abreviatura "rms" representa el proceso de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados mediante el cual se deriva este valor. En el proceso, primero se eleva al cuadrado la ecuación de una onda seno.

$$v^2 = V_p^2 \operatorname{sen}^2\theta$$

A continuación, se obtiene la media o valor promedio de v^2 dividiendo el área ubicada por debajo de un medio ciclo de la curva entre π (vea la figura B-1). El área se determina por integración e identidades trigonométricas.



▲ FIGURA B–1

$$V_{prom}^2 = \frac{\text{área}}{\pi} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_p^2 \operatorname{sen}^2\theta \, d\theta$$

$$= \frac{V_p^2}{2\pi}\int_0^{\pi}(1 - \cos 2\theta)d\theta = \frac{V_p^2}{2\pi}\int_0^{\pi} 1 \, d\theta - \frac{V_p^2}{2\pi}\int_0^{\pi}(-\cos 2\theta)\, d\theta$$

$$= \frac{V_p^2}{2\pi}(\theta - \tfrac{1}{2}\operatorname{sen} 2\theta)_0^{\pi} = \frac{V_p^2}{2\pi}(\pi - 0) = \frac{V_p^2}{2}$$

Por último, la raíz cuadrada de V_{prom}^2 es V_{rms}.

$$V_{rms} = \sqrt{V_{prom}^2} = \sqrt{V_p^2/2} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = 0.707V_p$$

Ecuación 11-12 Valor promedio de onda seno de semiciclo

El valor promedio de una onda seno se determina para un semiciclo porque el promedio de un ciclo completo es cero.

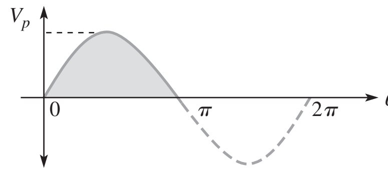
La ecuación para una onda seno es

$$v = V_p \operatorname{sen} \theta$$

El valor promedio del semiciclo es el área bajo la curva dividida entre la distancia de la curva a lo largo del eje horizontal (vea la figura B-2).

$$V_{\text{prom}} = \frac{\text{área}}{\pi}$$

▶ FIGURA B–2



Para calcular el área, se utiliza cálculo integral.

$$V_{\text{prom}} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_p \operatorname{sen}\theta \, d\theta = \frac{V_p}{\pi}(-\cos\theta)\Big|_0^{\pi}$$

$$= \frac{V_p}{\pi}[-\cos\pi - (-\cos 0)] = \frac{V_p}{\pi}[-(-1) - (-1)]$$

$$= \frac{V_p}{\pi}(2) = \frac{2}{\pi}V_p = 0.637V_p$$

Ecuaciones 12-25 y 13-13 Derivaciones de reactancia

Derivación de la reactancia capacitiva

$$\theta = 2\pi f t = \omega t$$

$$i = C\frac{dv}{dt} = C\frac{d(V_p \operatorname{sen}\theta)}{dt} = C\frac{d(V_p \operatorname{sen}\omega t)}{dt} = \omega C(V_p \cos\omega t)$$

$$I_{\text{rms}} = \omega C V_{\text{rms}}$$

$$X_C = \frac{V_{\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} = \frac{V_{\text{rms}}}{\omega C V_{\text{rms}}} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Derivación de la reactancia inductiva

$$v = L\frac{di}{dt} = L\frac{d(I_p \operatorname{sen}\omega t)}{dt} = \omega L(I_p \cos\omega t)$$

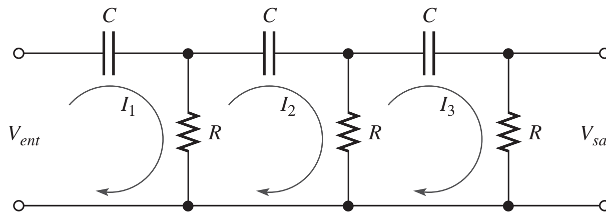
$$V_{\text{rms}} = \omega L I_{\text{rms}}$$

$$X_L = \frac{V_{\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} = \frac{\omega L I_{\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} = \omega L = 2\pi f L$$

Ecuación 15-33

El circuito de retroalimentación en el oscilador de desplazamiento de fase se compone de tres etapas *RC*, tal como indica la figura B-3. Una expresión para la atenuación se deriva aplicando el método de análisis de espiras para la asignación de espiras mostrada. Todos los resistores *R* y todos los capacitores *C* son del mismo valor.

$$(R - j1/2\pi fC)I_1 - RI_2 + 0I_3 = V_{ent}$$
$$-RI_1 + (2R - j1/2\pi fC)I_2 - RI_3 = 0$$
$$0I_1 - RI_2 + (2R - j1/2\pi fC)I_3 = 0$$



▲ FIGURA B–3

Para obtener V_{sal}, primero se debe resolver para I_3 por medio de determinantes:

$$I_3 = \frac{\begin{vmatrix} (R - j1/2\pi fC) & -R & V_{ent} \\ -R & (2R - j1/2\pi fC) & 0 \\ 0 & -R & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} (R - j1/2\pi fC) & -R & 0 \\ -R & (2R - j1/2\pi fC) & -R \\ 0 & -R & (2R - j1/2\pi fC) \end{vmatrix}}$$

$$I_3 = \frac{R^2 V_{ent}}{(R - j1/2\pi fC)(2R - j1/2\pi fC)^2 - R^2(2R - j1/2\pi fC) - R^2(R - 1/2\pi fC)}$$

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{RI_3}{V_{ent}}$$

$$= \frac{R^3}{(R - j1/2\pi fC)(2R - j1/2\pi fC)^2 - R^3(2 - j1/2\pi fRC) - R^3(1 - 1/2\pi fRC)}$$

$$= \frac{R^3}{R^3(1 - j1/2\pi fRC)(2 - j1/2\pi fRC)^2 - R^3[(2 - j1/2\pi fRC) - (1 - j1/2\pi fRC)]}$$

$$= \frac{R^3}{R^3(1 - j1/2\pi fRC)(2 - j1/2\pi fRC)^2 - R^3(3 - j1/2\pi fRC)}$$

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{1}{(1 - j1/2\pi fRC)(2 - j1/2\pi fRC)^2 - (3 - j1/2\pi fRC)}$$

Al ampliar y combinar los términos reales y los términos *j* por separado.

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{5}{4\pi^2 f^2 R^2 C^2}\right) - j\left(\frac{6}{2\pi fRC} - \frac{1}{(2\pi f)^3 R^3 C^3}\right)}$$

En cuanto a oscilación en el amplificador de desplazamiento de fase, el desplazamiento de fase a través del circuito RC debe ser igual a 180°. Para que exista esta condición, el término j debe ser de 0 en la frecuencia de oscilación f_r.

$$\frac{6}{2\pi f_r RC} - \frac{1}{(2\pi f_r)^3 R^3 C^3} = 0$$

$$\frac{6(2\pi)^2 f_r^2 R^2 C^2 - 1}{(2\pi)^3 f_r^3 R^3 C^3} = 0$$

$$6(2\pi)^2 f_r^2 R^2 C^2 - 1 = 0$$

$$f_r^2 = \frac{1}{6(2\pi)^2 R^2 C^2}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

Ecuación 17-13 Frecuencia resonante para un circuito resonante no ideal en paralelo

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{R_W + jX_L}$$

$$= j\left(\frac{1}{X_C}\right) + \frac{R_W - jX_L}{(R_W + jX_L)(R_W - jX_L)} = j\left(\frac{1}{X_C}\right) + \frac{R_W - jX_L}{R_W^2 + X_L^2}$$

El primer término más la separación del numerador del segundo término da

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = j\left(\frac{1}{X_C}\right) - j\left(\frac{X_L}{R_W^2 + X_L^2}\right) + \frac{R_W}{R_W^2 + X_L^2}$$

Los términos j son iguales.

$$\frac{1}{X_C} = \frac{X_L}{R_W^2 + X_L^2}$$

Por tanto,

$$R_W^2 = X_L^2 = X_L X_C$$

$$R_W^2 + (2\pi f_r L)^2 = \frac{2\pi f_r L}{2\pi f_r C}$$

$$R_W^2 + 4\pi^2 f_r^2 L^2 = \frac{L}{C}$$

$$4\pi^2 f_r^2 L^2 = \frac{L}{C} - R_W^2$$

Al resolver para f_r^2,

$$f_r^2 = \frac{\left(\frac{L}{C}\right) - R_W^2}{4\pi^2 L^2}$$

Se multiplican tanto el numerador como el denominador por C,

$$f_r^2 = \frac{L - R_W^2 C}{4\pi^2 L^2 C} = \frac{L - R_W^2 C}{L(4\pi^2 LC)}$$

Al factorizar L en el numerador y eliminar términos se obtiene

$$f_r^2 = \frac{1 - (R_W^2 C/L)}{4\pi^2 LC}$$

Al tomar la raíz cuadrada de ambos lados se obtiene f_r,

$$f_r = \frac{\sqrt{1 - (R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ecuación 17-16 Impedancia de un circuito tanque no ideal en condición de resonancia

Se inicia con la siguiente expresión para $1/\mathbf{Z}$ que se desarrolló al derivar la ecuación 17-13.

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = j\left(\frac{1}{X_C}\right) - j\left(\frac{X_L}{R_W^2 + X_L^2}\right) + \frac{R_W}{R_W^2 + X_L^2}$$

En condición de resonancia, **Z** es puramente resistiva; por lo que no tiene parte j (en la última expresión los términos j se eliminan). Por tanto, sólo queda la parte real, como se establece en la siguiente ecuación para Z en condición de resonancia:

$$Z_r = \frac{R_W^2 + X_L^2}{R_W}$$

Separando el denominador, se obtiene

$$Z_r = \frac{R_W^2}{R_W} + \frac{X_L^2}{R_W} = R_W + \frac{X_L^2}{R_W}$$

Al factorizar R_W se obtiene

$$Z_r = R_W\left(1 + \frac{X_L^2}{R_W^2}\right)$$

Como $X_L^2/R_W^2 = Q^2$, entonces

$$Z_r = R_W(Q^2 + 1)$$

Apéndice C

CODIFICACIÓN DE COLOR PARA CAPACITORES

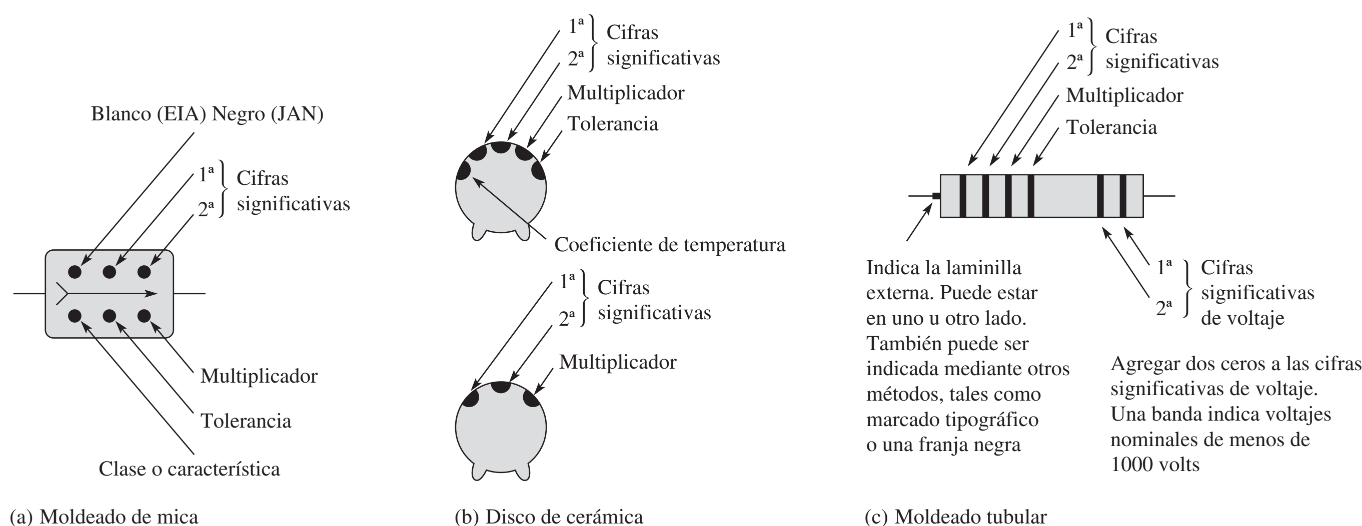
Algunos capacitores se designan por medio de códigos de color. El código de colores utilizado para capacitores es básicamente el mismo que el empleado en resistores. Ocurren algunas variaciones en la designación de la tolerancia. Los códigos de color básicos se muestran en la tabla C-1, y algunos capacitores típicos designados con códigos de color aparecen ilustrados en la figura C-1.

▶ **TABLA C–1**

Códigos de color compuestos típicos para capacitores (en picofarads).

COLOR	DÍGITO	MULTIPLICADOR	TOLERANCIA
Negro	0	1	20%
Café	1	10	1%
Rojo	2	100	2%
Naranja	3	1000	3%
Amarillo	4	10000	
Verde	5	100000	5% (EIA)
Azul	6	1000000	
Violeta	7		
Gris	8		
Blanco	9		
Oro		0.1	5% (JAN)
Plata		0.01	10%

NOTA: EIA significa Electronic Industries Association, y JAN significa Joint Army-Navy, una norma militar.



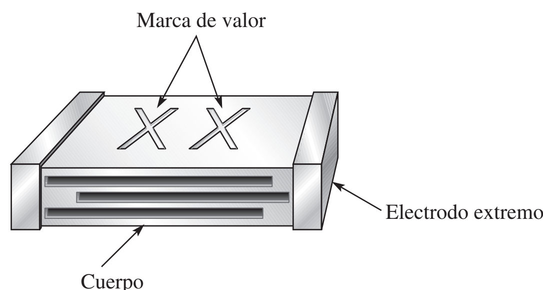
▲ **FIGURA C–1**

Capacitores típicos identificados mediante códigos de color.

Sistemas de marcado

Un capacitor, como el que muestra la figura C-2, tiene ciertas características que lo identifican.

- Cuerpo de color sólido (blanco mezclado con otro color claro, beige, gris, canela o café).
- Los electrodos encierran por completo los extremos de la parte.
- Muchos tamaños diferentes:
  1. Tipo 1206: 0.125 pulg de largo por 0.063 pulg de ancho (3.2 mm × 1.6 mm) con espesor y color variables.
  2. Tipo 0805: 0.080 pulg de largo por 0.050 pulg de ancho (2.0 mm × 1.25 mm) con espesor y color variables.
  3. Tamaño variable con un solo color (casi siempre canela o café translúcido). Los tamaños varían desde 0.059 pulg (1.5 mm) hasta 0.220 pulg (5.6 mm) de longitud, y ancho desde 0.032 pulg (0.8 mm) hasta 0.197 pulg (5.0 mm).
- Tres sistemas de marcado diferentes:
  1. Dos lugares (letra y número únicamente).
  2. Dos lugares (letra y número o dos números).
  3. Un lugar (letra de color variable).

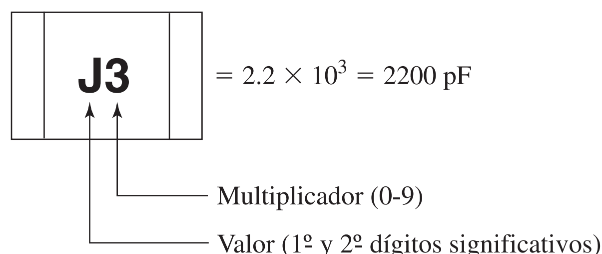


▲ **FIGURA C–2**

Marcado de capacitor.

Código estándar de dos lugares

Consulte la tabla C-2.



Ejemplos: S2 = 4.7 × 100 = 470 pF
b0 = 3.5 × 1.0 = 3.5 pF

▶ TABLA C–2

VALOR*						MULTIPLICADOR
A	1.0	L	2.7	T	5.1	0 = ×1.0
B	1.1	M	3.0	U	5.6	1 = ×10
C	1.2	N	3.3	m	6.0	2 = ×100
D	1.3	b	3.5	V	6.2	3 = ×1000
E	1.5	P	3.6	W	6.8	4 = ×10000
F	1.6	Q	3.9	n	7.0	5 = ×100000
G	1.8	d	4.0	X	7.5	etc.
H	2.0	R	4.3	t	8.0	
J	2.2	e	4.5	Y	8.2	
K	2.4	S	4.7	y	9.0	
a	2.5	f	5.0	Z	9.1	

*Advierta el uso de letras mayúsculas y minúsculas.

Código alterno de dos lugares

Consulte la tabla C-3.

- Valores por debajo de 100 pF —Lea el valor directamente

05 = 5 pF   82 = 82 pF

- Valores de 100 pF y más altos -Código de letra/número

A1 = 10 × 10 = 100 pF   N3 = 33 × 1000 = 33000 pF = .033 μF

Multiplicador (1-9)

Valor (1º y 2º dígitos significativos)

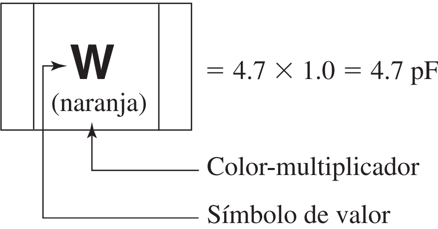
▶ TABLA C–3

VALOR*						MULTIPLICADOR
A	10	J	22	S	47	1 = ×10
B	11	K	24	T	51	2 = ×100
C	12	L	27	U	56	3 = ×1000
D	13	M	30	V	62	4 = ×10000
E	15	N	33	W	68	5 = ×100000
F	16	P	36	X	75	etc.
G	18	Q	39	Y	82	
H	20	R	43	Z	91	

*Advierta el uso de únicamente letras mayúsculas.

Código estándar de un solo lugar

Consulte la tabla C-4.



Ejemplos: R (verde) = 3.3 × 100 = 330 pF
7 (azul) = 8.2 × 1000 = 8200 pF

◀ **TABLA C–4**

VALOR						MULTIPLICADOR (COLOR)
A	1.0	K	2.2	W	4.7	Naranja = ×1.0
B	1.1	L	2.4	X	5.1	Negro = ×10
C	1.2	N	2.7	Y	5.6	Verde = ×100
D	1.3	O	3.0	Z	6.2	Azul = ×1000
E	1.5	R	3.3	3	6.8	Violeta = ×10000
H	1.6	S	3.6	4	7.5	Rojo = ×100000
I	1.8	T	3.9	7	8.2	
J	2.0	V	4.3	9	9.1	

Respuestas a los problemas de número impar

Capítulo 1

1. **(a)** 3×10^3 **(b)** 7.5×10^4 **(c)** 2×10^6

3. **(a)** 8.4×10^3 **(b)** 9.9×10^4 **(c)** 2×10^5

5. **(a)** 3.2×10^4 **(b)** 6.8×10^{-3} **(c)** 8.7×10^{10}

7. **(a)** 0.0000025 **(b)** 500 **(c)** 0.39

9. **(a)** 4.32×10^7 **(b)** 5.00085×10^3
(c) 6.06×10^{-8}

11. **(a)** 2.0×10^9 **(b)** 3.6×10^{14}
(c) 1.54×10^{-14}

13. **(a)** 89×10^3 **(b)** 450×10^3
(c) 12.04×10^{12}

15. **(a)** 345×10^{-6} **(b)** 25×10^{-3}
(c) 1.29×10^{-9}

17. **(a)** 7.1×10^{-3} **(b)** 101×10^6
(c) 1.50×10^6

19. **(a)** 22.7×10^{-3} **(b)** 200×10^6
(c) 848×10^{-3}

21. **(a)** 345 μA **(b)** 25 mA **(c)** 1.29 nA

23. **(a)** 3 μF **(b)** 3.3 MΩ **(c)** 350 nA

25. **(a)** 7.5×10^{-12} A **(b)** 3.3×10^9 Hz
(c) 2.8×10^{-7} W

27. **(a)** 5000 μA **(b)** 3.2 mW
(c) 5 MV **(d)** 10,000 kW

29. **(a)** 50.68 mA **(b)** 2.32 MΩ **(c)** 0.0233 μF

Capítulo 2

1. 4.64×10^{-18} C

3. 80×10^{12} C

5. **(a)** 10 V **(b)** 2.5 V **(c)** 4 V

7. 20 V

9. 33.3 V

11. 0.2 A

13. 0.15 C

15. **(a)** 200 mS **(b)** 40 mS **(c)** 10 mS

17. Fuente de potencia de cd, celda solar, generador, batería

19. La fuente de potencia convierte voltaje de ca en voltaje de cd.

21. **(a)** 27 kΩ $\pm$ 5% **(b)** 1.8 kΩ $\pm$ 10%

23. 330 Ω: naranja, naranja, café, oro
2.2 kΩ: rojo, rojo, rojo, oro
56 kΩ: verde, azul, naranja, oro
100 kΩ: café, negro, amarillo, oro
39 kΩ: naranja, blanco, naranja, oro

25. **(a)** amarillo, violeta, plata, oro
(b) rojo, violeta, amarillo, oro
(c) verde, café, verde, oro

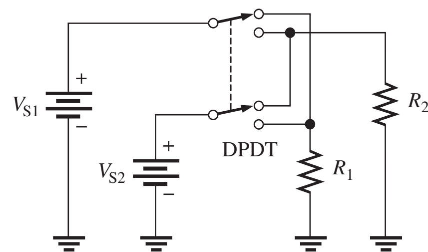
27. **(a)** café, amarillo, violeta, rojo, café
(b) naranja, blanco, rojo, oro, café
(c) blanco, violeta, azul, café, café

29. 4.7 kΩ

31. A través de la lámpara 2

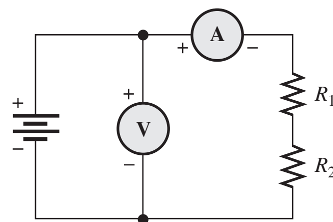
33. Circuito (b)

35. Vea la figura P-1.



▲ FIGURA P–1

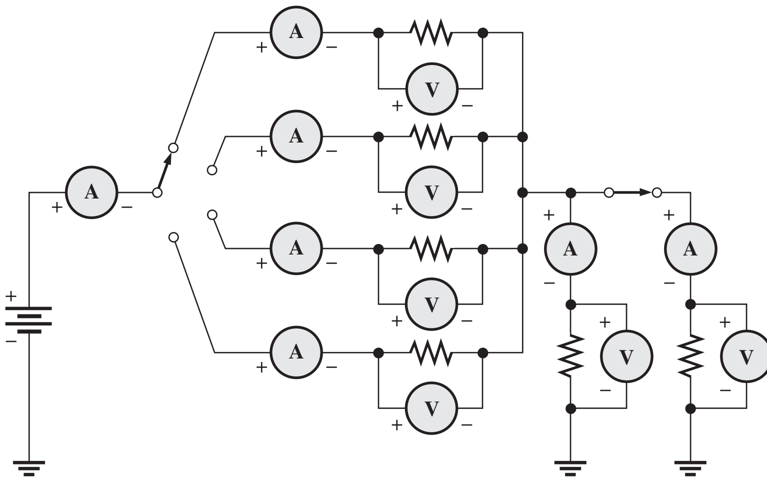
37. Vea la figura P-2.



▲ FIGURA P–2

39. Posición 1: V1 = 0 V, V2 = V_S
Posición 2: V1 = V_S, V2 = 0 V

41. Vea la figura P-3.

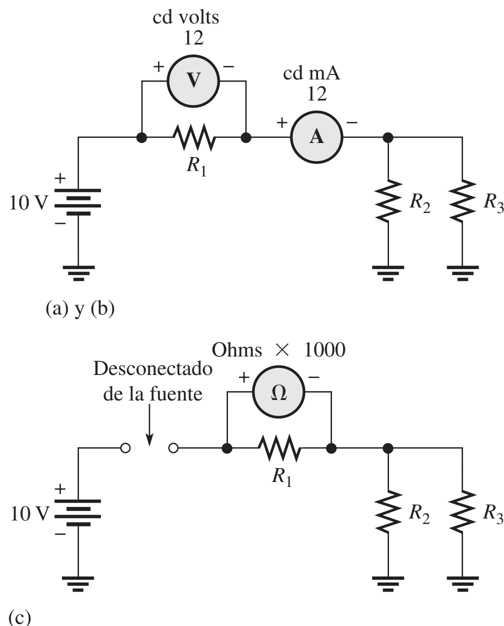


▲ FIGURA P–3

43. 250 V

45. **(a)** 20 Ω **(b)** 1.50 MΩ **(c)** 4500 Ω

47. Vea la figura P-4.



▲ FIGURA P–4

Capítulo 3

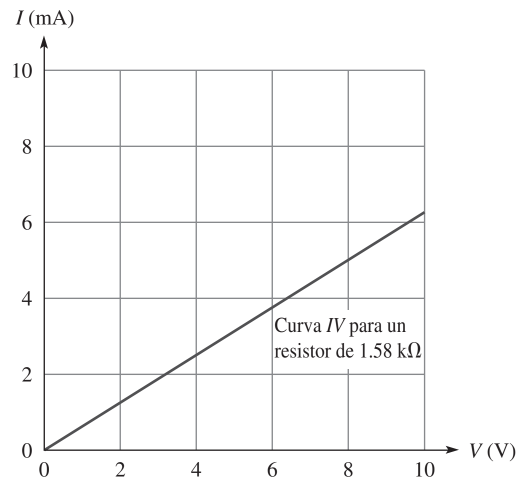
1. **(a)** La corriente se triplica.
   (b) La corriente se reduce al 75%.
   (c) La corriente se reduce a la mitad.
   (d) La corriente se incrementa un 54%.
   (e) La corriente se cuadruplica.
   (f) La corriente no cambia.

3. $V = IR$

5. La gráfica es una línea recta, lo que indica una relación lineal entre V e I.

7. $R_1 = 0.5\ \Omega$, $R_2 = 1.0\ \Omega$, $R_3 = 2\ \Omega$

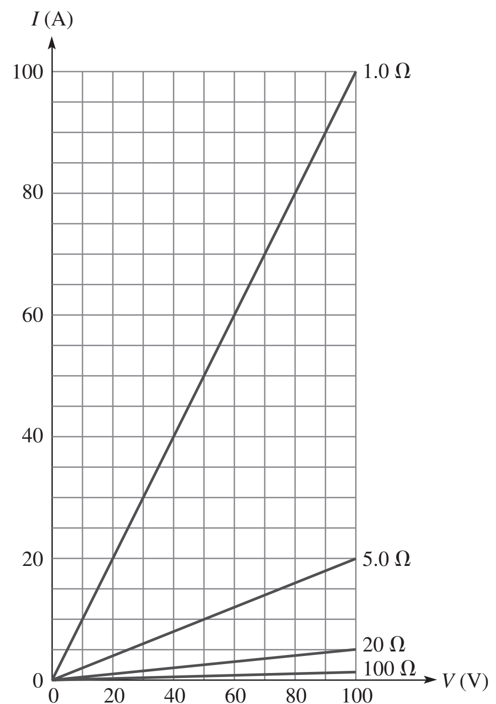
9. Vea la figura P-5.



▲ FIGURA P–5

11. El voltaje disminuyó 4 V (de 10 a 6 V).

13. Vea la figura P-6.



▲ FIGURA P–6

15. **(a)** 5 A **(b)** 1.5 A **(c)** 500 mA
(d) 2 mA **(e)** 44.6 μA

17. 1.2 A

19. 532 μA

21. Sí. La corriente ahora es de 0.642 A, lo cual excede la capacidad del fusible.

23. **(a)** 36 V **(b)** 280 V **(c)** 1700 V
(d) 28.2 V **(e)** 56 V

25. 81 V

27. **(a)** 59.9 mA **(b)** 5.99 V **(c)** 4.61 mV

29. **(a)** 2 kΩ **(b)** 3.5 kΩ **(c)** 2 kΩ
(d) 100 kΩ **(e)** 1.0 MΩ

31. 150 Ω

33. 133 Ω; 100 Ω; la fuente puede ponerse en cortocircuito si el reóstato se ajusta a 0 Ω.

35. 95 Ω

37. Cinco

39. $R_A = 560$ kΩ; $R_B = 2.2$ MΩ;
$R_C = 1.8$ kΩ; $R_D = 33$ Ω

41. $V = 18$ V; $I = 5.455$ mA;
$R = 3.3$ kΩ

Capítulo 4

1. volt = joule/coulomb
amp = coulomb/segundo
VI = joule/coulomb × coulomb/segundo = joule/seg = watt

3. 350 W

5. 20 kW

7. **(a)** 1 MW **(b)** 3 MW
(c) 150 MW **(d)** 8.7 MW

9. **(a)** 2,000,000 μW
(b) 500 μW
(c) 250 μW
(d) 6.67 μW

11. 8640 J

13. 2.02 kW/día

15. 0.00186 kWh

17. 37.5 Ω

19. 360 W

21. 100 μW

23. 40.2 mW

25. **(a)** 0.480 Wh **(b)** Igual

27. Por lo menos 12 W, para permitir un margen de seguridad del 20%

29. 7.07 V

31. 50,544 J

33. 8 A

35. 100 mW, 80%

37. 0.08 kWh

39. $V = 5$ V; $I = 5$ mA;
$R = 1$ kΩ

Capítulo 5

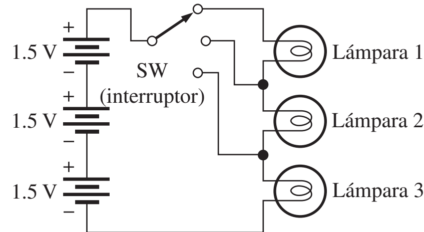
1. Vea la figura P-7.

3. 170 kΩ

5. R_1, R_7, R_8 y R_{10} están en serie.
R_2, R_4, R_6 y R_{11} están en serie.
R_3, R_5, R_9 y R_{12} están en serie.

7. 5 mA

9. Vea la figura P-8.



▲ FIGURA P–8

11. **(a)** 1560 Ω **(b)** 103 Ω
(c) 13.7 kΩ **(d)** 3.671 MΩ

13. 67.2 kΩ

15. 3.9 kΩ

17. 17.8 MΩ

19. **(a)** 625 μA **(b)** 4.26 μA

21. **(a)** 34 mA **(b)** 16 V **(c)** 0.543 W

23. $R_1 = 330$ Ω, $R_2 = 220$ Ω, $R_3 = 100$ Ω, $R_4 = 470$ Ω

25. **(a)** 331 Ω
(b) Posición *B:* 9.15 mA
Posición *C:* 14.3 mA
Posición *D:* 36.3 mA
(c) No

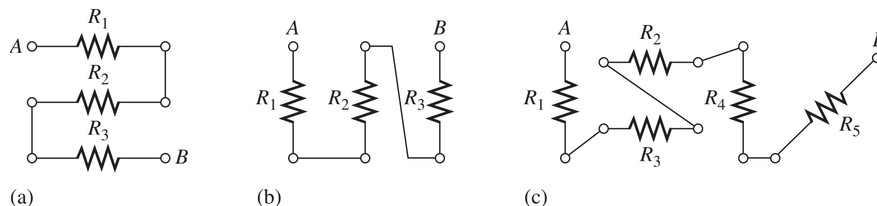
27. 14 V

29. **(a)** 23 V **(b)** 35 V **(c)** 0 V

31. 4 V

33. 22 Ω

▶ FIGURA P–7



35. Posición *A:* 4.0 V
Posición *B:* 4.5 V
Posición *C:* 5.4 V
Posición *D:* 7.2 V

37. 4.82%

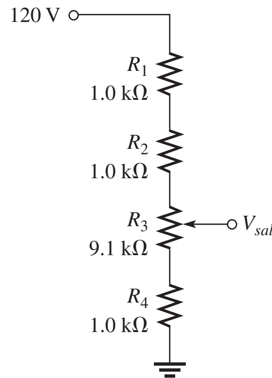
39. Salida $A = 15$ V
Salida $B = 10.6$ V
Salida $C = 2.62$ V

41. $V_R = 6$ V, $V_{2R} = 12$ V, $V_{3R} = 18$ V,
$V_{4R} = 24$ V, $V_{5R} = 30$ V

43. $V_2 = 1.79$ V, $V_3 = 1$ V, $V_4 = 17.9$ V

45. Vea la figura P-9.

▶ FIGURA P–9



47. 54.9 mW

49. 12.5 MΩ

51. $V_A = 100$ V, $V_B = 57.7$ V, $V_C = 15.2$ V, $V_D = 7.58$ V

53. $V_A = 14.82$ V, $V_B = 12.97$ V, $V_C = 12.64$ V, $V_D = 9.34$ V

55. **(a)** R_4 está abierto. **(b)** Corto de *A* a *B*

57. La tabla 5-1 es correcta.

59. Sí. Hay un corto entre la clavija 4 y el lado superior de R_{11}.

61. $R_T = 7.481$ kΩ

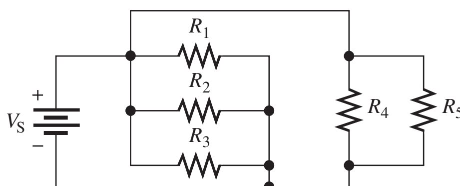
63. $R_3 = 22$ Ω

65. R_1 en cortocircuito

Capítulo 6

1. Vea la figura P-10.

3. R_1, R_2, R_5, R_9, R_{10}, y R_{12} están en paralelo.
R_4, R_6, R_7, y R_8 están en paralelo.
R_3 y R_{11} están en paralelo.



▲ FIGURA P–10

5. 100 V

7. Posición A:
$V_1 = 15$ V, $V_2 = 0$ V, $V_3 = 0$ V, $V_4 = 15$ V
Posición B:
$V_1 = 15$ V, $V_2 = 0$ V, $V_3 = 15$ V, $V_4 = 0$ V
Posición C:
$V_1 = 15$ V, $V_2 = 15$ V, $V_3 = 0$ V, $V_4 = 0$ V

9. 1.35 A

11. $R_2 = 22$ Ω, $R_3 = 100$ Ω, $R_4 = 33$ Ω

13. 11.4 mA

15. **(a)** 359 Ω **(b)** 25.6 Ω **(c)** 819 Ω **(d)** 997 Ω

17. 567 Ω

19. 24.6 Ω

21. **(a)** 510 kΩ **(b)** 245 kΩ **(c)** 510 kΩ **(d)** 193 kΩ

23. 10 A

25. 50 mA; Cuando un foco se funde, los demás focos permanecen encendidos.

27. 53.7 Ω

29. $I_2 = 167$ mA, $I_3 = 83.3$ mA, $I_T = 300$ mA,
$R_1 = 2$ kΩ, $R_2 = 600$ Ω

31. Posición *A:* 2.25 mA
Posición *B:* 4.75 mA
Posición *C:* 7 mA

33. **(a)** $I_1 = 6.88\ \mu$A, $I_2 = 3.12\ \mu$A
(b) $I_1 = 5.25$ mA, $I_2 = 2.39$ mA, $I_3 = 1.59$ mA,
$I_4 = 772\ \mu$A

35. $R_1 = 3.3$ kΩ, $R_2 = 1.8$ kΩ, $R_3 = 5.6$ kΩ, $R_4 = 3.9$ kΩ

37. **(a)** 1 mΩ **(b)** 5 μA

39. **(a)** 68.8 μW **(b)** 52.5 mW

41. $P_1 = 1.25$ W, $I_2 = 75$ mA, $I_1 = 125$ mA, $V_S = 10$ V,
$R_1 = 80$ Ω, $R_2 = 133$ Ω

43. 682 mA, 3.41 A

45. El resistor de 8.2 kΩ está abierto.

47. Conectar el ohmmetro entre las siguientes clavijas:

Clavijas 1-2
Lectura correcta: $R = 1.0\ \text{k}\Omega \| 3.3\ \text{k}\Omega = 767\ \Omega$

R_1 abierto: $R = 3.3$ kΩ
R_2 abierto: $R = 1.0$ kΩ

Clavijas 3-4
Lectura correcta: $R = 270\ \Omega \| 390\ \Omega = 159.5\ \Omega$

R_3 abierto: $R = 390$ Ω
R_4 abierto: $R = 270$ Ω

Clavijas 5-6
Lectura correcta:

$R = 1.0\ \text{M}\Omega \| 1.8\ \text{M}\Omega \| 680\ \text{k}\Omega \| 510\ \text{k}\Omega = 201\ \text{k}\Omega$

R_5 abierto: $R = 1.8\ \text{M}\Omega \| 680\ \text{k}\Omega \| 510\ \text{k}\Omega = 251\ \text{k}\Omega$

R_6 abierto: $R = 1.0\ \text{M}\Omega \| 680\ \text{k}\Omega \| 510\ \text{k}\Omega = 226\ \text{k}\Omega$

R_7 abierto: $R = 1.0\ \text{M}\Omega \| 1.8\ \text{M}\Omega \| 510\ \text{k}\Omega = 284\ \text{k}\Omega$

R_8 abierto: $R = 1.0\ \text{M}\Omega \| 1.8\ \text{M}\Omega \| 680\ \text{k}\Omega = 330\ \text{k}\Omega$

49. Corto entre las clavijas 3 y 4:

(a) $R_{1\text{-}2} = (R_1 \| R_2 \| R_3 \| R_4 \| R_{11} \| R_{12}) + (R_5 \| R_6 \| R_7 \| R_8 \| R_9 \| R_{10}) = 940\ \Omega$

(b) $R_{2\text{-}3} = R_5 \| R_6 \| R_7 \| R_8 \| R_9 \| R_{10} = 518\ \Omega$

(c) $R_{2\text{-}4} = R_5 \| R_6 \| R_7 \| R_8 \| R_9 \| R_{10} = 518\ \Omega$

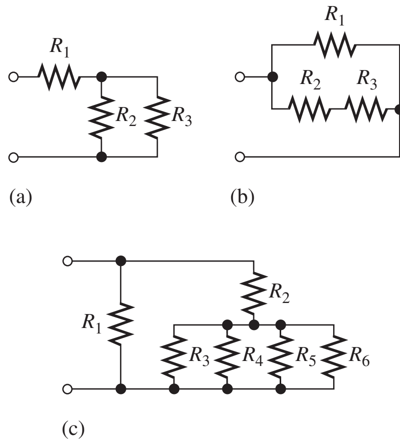
(d) $R_{1\text{-}4} = R_1 \| R_2 \| R_3 \| R_4 \| R_{11} \| R_{12} = 422\ \Omega$

51. R_2 abierto

53. $V_S = 3.30$ V

Capítulo 7

1. Vea la figura P-11.



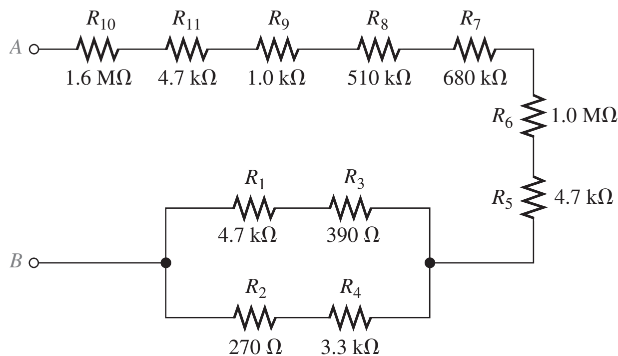
▲ **FIGURA P–11**

3. **(a)** R_1 y R_4 están en serie con la combinación en paralelo de R_2 y R_3.

(b) R_1 está en serie con la combinación en paralelo de R_2, R_3 y R_4.

(c) La combinación en paralelo de R_2 y R_3 está en serie con la combinación en paralelo de R_4 y R_5. Todo esto está en paralelo con R_1.

5. Vea la figura P-12.

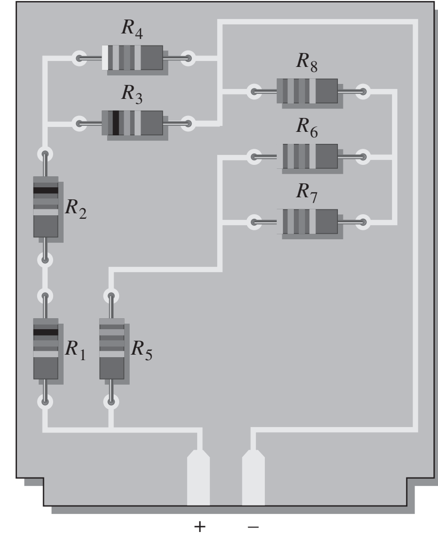


▲ **FIGURA P–12**

7. Vea la figura P-13.

9. **(a)** 133 Ω **(b)** 779 Ω **(c)** 852 Ω

▶ **FIGURA P–13**



11. **(a)** $I_1 = I_4 = 11.3$ mA, $I_2 = I_3 = 5.64$ mA, $V_1 = 633$ mV, $V_2 = V_3 = 564$ mV, $V_4 = 305$ mV

(b) $I_1 = 3.85$ mA, $I_2 = 563\ \mu$A, $I_3 = 1.16$ mA, $I_4 = 2.13$ mA, $V_1 = 2.62$ V, $V_2 = V_3 = V_4 = 383$ mV

(c) $I_1 = 5$ mA, $I_2 = 303\ \mu$A, $I_3 = 568\ \mu$A, $I_4 = 313\ \mu$A, $I_5 = 558\ \mu$A, $V_1 = 5$ V, $V_2 = V_3 = 1.88$ V, $V_4 = V_5 = 3.13$ V

13. SW1 cerrado, SW2 abierto: 220 Ω

SW1 cerrado, SW2 cerrado: 200 Ω

SW1 abierto, SW2 abierto: 320 Ω

SW1 abierto, SW2 cerrado: 300 Ω

15. $V_A = 100$ V, $V_B = 61.5$ V, $V_C = 15.7$ V, $V_D = 7.87$ V

17. Medir el voltaje en A con respecto a tierra y el voltaje en B con respecto a tierra. La diferencia es V_{R2}.

19. 303 kΩ

21. **(a)** 110 kΩ **(b)** 110 mW

23. $R_{AB} = 1.32$ kΩ

$R_{BC} = 1.32$ kΩ

$R_{CD} = 0\ \Omega$

25. 7.5 V sin carga, 7.29 V con carga

27. 47 kΩ

29. 8.77 V

31. $R_1 = 1000\ \Omega$; $R_2 = R_3 = 500\ \Omega$;

toma inferior cargada: $V_{\text{inferior}} = 1.82$ V, $V_{\text{superior}} = 4.55$ V

toma superior cargada: $V_{\text{inferior}} = 1.67$ V, $V_{\text{superior}} = 3.33$ V

33. **(a)** $V_G = 1.75$ V, $V_S = 3.25$ V
(b) $I_1 = I_2 = 6.48\ \mu$A, $I_D = I_S = 2.17$ mA
(c) $V_{DS} = 2.55$ V, $V_{DG} = 4.05$ V
35. 1000 V
37. **(a)** intervalo de 0.5 **(b)** Aproximadamente 1 mV
39. **(a)** 271 Ω **(b)** 221 mA **(c)** 58.7 mA **(d)** 12 V
41. 621 Ω, $I_1 = I_9 = 16.1$ mA, $I_2 = 8.27$ mA,
$I_3 = I_8 = 7.84$ mA, $I_4 = 4.06$ mA, $I_5 = I_6 = I_7 = 3.78$ mA
43. 971 mA
45. **(a)** 9 V **(b)** 3.75 V **(c)** 11.25 V
47. 6 mV (lado derecho positivo con respecto al izquierdo)
49. No, deberá ser de 4.39 V.
51. El resistor de 2.2 kΩ (R_3) está abierto.
53. El resistor de 3.3 kΩ (R_4) está abierto.
55. $R_T = 296.7$ Ω
57. $R_3 = 560$ kΩ
59. R_5 en cortocircuito

Capítulo 8

1. $I_S = 6$ A, $R_S = 50$ Ω
3. 200 mΩ
5. $V_S = 720$ V, $R_S = 1.2$ kΩ
7. 845 μA
9. 1.6 mA
11. $V_{máx} = 3.72$ V; $V_{mín} = 1.32$ V
13. 90.7 V
15. $I_{S1} = 2.28$ mA, $I_{S2} = 1.35$ mA
17. 116 μA
19. $R_{TH} = 88.6$ Ω, $V_{TH} = 1.09$ V
21. 100 μA
23. **(a)** $I_N = 110$ mA, $R_N = 76.7$ Ω
(b) $I_N = 11.1$ mA, $R_N = 73$ Ω
(c) $I_N = 50\ \mu$A, $R_N = 35.9$ kΩ
(d) $I_N = 68.8$ mA, $R_N = 1.3$ kΩ
25. 17.9 V
27. $I_N = 953\ \mu$A, $R_N = 1175$ Ω
29. $I_N = -48.2$ mA, $R_N = 56.9$ Ω
31. 11.1 Ω
33. $R_{TH} = 48$ Ω, $R_4 = 160$ Ω
35. **(a)** $R_A = 39.8$ Ω, $R_B = 73$ Ω, $R_C = 48.7$ Ω
(b) $R_A = 21.2$ kΩ, $R_B = 10.3$ kΩ, $R_C = 14.9$ kΩ
37. R_1 con fugas
39. $I_N = 0.383$ mA; $R_N = 9.674$ kΩ
41. $I_{AB} = 1.206$ mA; $V_{AB} = 3.432$ V;
$R_L = 2.846$ kΩ

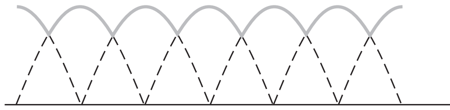
Capítulo 9

1. $I_1 = 371$ mA; $I_2 = 143$ mA
3. $I_1 = 0$ A, $I_2 = 2$ A
5. **(a)** −16,470 **(b)** −1.59
7. $I_1 = 1.24$ A, $I_2 = 2.05$ A, $I_3 = 1.89$ A
9. X1 = .371428571429 ($I_1 = 371$ mA)
X2 = −.142857142857 ($I_2 = -143$ mA)
11. $I_1 - I_2 - I_3 = 0$
13. $V_1 = 5.66$ V, $V_2 = 6.33$ V, $V_3 = 325$ mV
15. −1.84 V
17. $I_1 = -5.11$ mA, $I_2 = -3.52$ mA
19. $V_1 = 5.11$ V, $V_3 = 890$ mV, $V_2 = 2.89$ V
21. $I_1 = 15.6$ mA, $I_2 = -61.3$ mA, $I_3 = 61.5$ mA
23. −11.2 mV
25. Nota: todos los resistores (coeficientes) están en kΩ.
Espira A: $5.48I_A - 3.3I_B - 1.5I_C = 0$
Espira B: $-3.3I_A + 4.12I_B - 0.82I_C = 15$
Espira C: $-1.5I_A - 0.82I_B + 4.52I_C = 0$
27. $I_1 = 20.6$ mA, $I_3 = 193$ mA, $I_2 = -172$ mA
29. $V_A = 1.5$ V, $V_B = -5.65$ V
31. $I_1 = 193\ \mu$A, $I_2 = 370\ \mu$A, $I_3 = 179\ \mu$A,
$I_4 = 328\ \mu$A, $I_5 = 1.46$ mA, $I_6 = 522\ \mu$A,
$I_7 = 2.16$ mA, $I_8 = 1.64$ mA, $V_A = -3.70$ V,
$V_B = -5.85$ V, $V_C = -15.7$ V
33. No hay falla
35. R_4 abierto
37. Fusible inferior abierto
39. R_4 abierto

Capítulo 10

1. Disminuye
3. 37.5 μWb
5. 1000 G
7. 597
9. 150 At
11. **(a)** Campo electromagnético **(b)** Resorte
13. Fuerzas producidas por la interacción del campo electromagnético y el campo magnético permanente.
15. Cambiando la corriente.
17. Material A
19. La intensidad del campo magnético, la longitud del conductor expuesta al campo, y la velocidad de rotación del conductor.
21. La ley de Lenz define la polaridad del voltaje inducido.
23. El ensamble de conmutador y escobillas conecta eléctricamente la espira al circuito externo.

25. Figura P–14.



▲ **FIGURA P–14**

Capítulo 11

1. **(a)** 1 Hz **(b)** 5 Hz **(c)** 20 Hz
(d) 1 kHz **(e)** 2 kHz **(f)** 100 kHz

3. 2 μs

5. 250 Hz

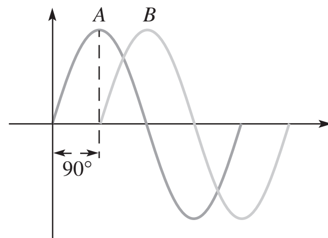
7. 200 rps

9. **(a)** 7.07 mA **(b)** 0 A (ciclo completo), 4.5 mA (medio ciclo)
(c) 14.14 mA

11. **(a)** 0.524 o $\pi/6$ rad **(b)** 0.785 o $\pi/4$ rad
(c) 1.361 o $39\pi/90$ rad **(d)** 2.356 o $3\pi/4$ rad
(e) 3.491 o $10\pi/9$ rad **(f)** 5.236 o $5\pi/3$ rad

13.15°, *A* adelantada

▶ **FIGURA P–15**



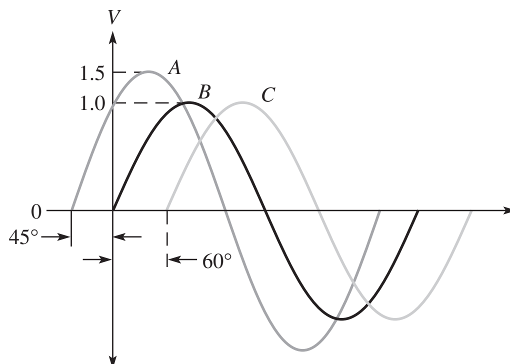
15. Vea la figura P-15.

17. **(a)** 57.4 mA **(b)** 99.6 mA **(c)** −17.4 mA
(d) −57.4 mA **(e)** −99.6 mA **(f)** 0 mA

19. 30°: 13.0 V
45°: 14.5 V
90°: 13.0 V
180°: −7.5 V
200°: −11.5 V
300°: −7.5 V

21. 22.1 V

23. Vea la figura P-16.



▲ **FIGURA P–16**

25. **(a)** 156 mV **(b)** 1 V **(c)** 0 V

27. 27. $V_{1(\text{prom})} = 40.5$ V, $V_{2(\text{prom})} = 31.5$ V

29. $V_{máx} = 39$ V, $V_{mín} = 9$ V

31. −1 V

33. $t_r \cong 3.0$ ms, $t_f \cong 3.0$ ms, $t_W \cong 12.0$ ms, Ampl. $\cong 5$ V

35. 5.84 V

37. **(a)** −0.375 V **(b)** 3.01 V

39. **(a)** 50 kHz **(b)** 10 Hz

41. 75 kHz, 125 kHz, 175 kHz, 225 kHz, 275 kHz, 325 kHz

43. $V_p = 600$ mV, $T = 500$ ms

45. $V_{p(ent)} = 4.44$ V, $f_{ent} = 2$ Hz

47. $V_1 = 16.717\ V_{pp}$; $V_1 = 5.911\ V_{rms}$;
$V_2 = 36.766\ V_{pp}$; $V_2 = 13.005\ V_{rms}$;
$V_3 = 14.378\ V_{pp}$; $V_3 = 5.084\ V_{rms}$

49. No hay falla

51. $V_{mín} = 2.000\ V_p$; $V_{máx} = 22.000\ V_p$

Capítulo 12

1. **(a)** 5 μF **(b)** 1 μC **(c)** 10 V

3. **(a)** 0.001 μF **(b)** 0.0035 μF **(c)** 0.00025 μF

5. 125 J

7. **(a)** 8.85×10^{-12} F/m **(b)** 35.4×10^{-12} F/m
(c) 66.4×10^{-12} F/m **(d)** 17.7×10^{-12} F/m

9. 983 pF

11. 0.0249 μF

13. Incremento de 12.5 pF

15. Cerámica

17. Aluminio, tantalio; están polarizados

19. **(a)** 0.022 μF **(b)** 0.047 μF
(c) 0.001 μF **(d)** 220 pF

21. **(a)** 0.688 μF **(b)** 69.7 pF **(c)** 2.64 μF

23. 2 μF

25. **(a)** 1057 pF **(b)** 0.121 μF

27. **(a)** 2.62 μF **(b)** 689 pF **(c)** 1.6 μF

29. **(a)** 0.411 μC
(b) $V_1 = 10.47$ V
$V_2 = 1.54$ V
$V_3 = 6.52$ V
$V_4 = 5.48$ V

31. **(a)** 13.2 ms **(b)** 247.5 μs **(c)** 11 μs **(d)** 280 μs

33. **(a)** 9.20 V **(b)** 1.24 V **(c)** 0.458 V **(d)** 0.168 V

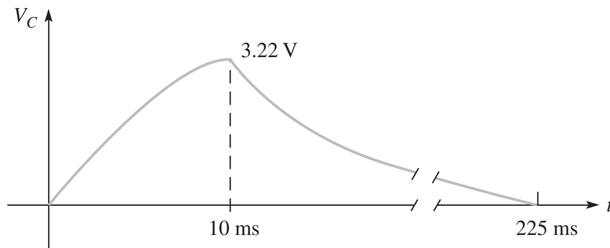
35. **(a)** 17.9 V **(b)** 12.8 V **(c)** 6.59 V

37. 7.62 μs

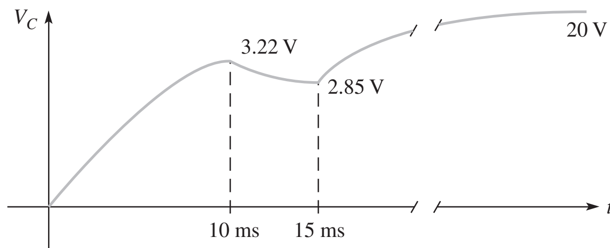
39. 3.00 μs

41. Vea la figura P-17.

43. **(a)** 30.4 Ω **(b)** 116 kΩ **(c)** 49.7 Ω



(a)



(b)

▲ FIGURA P–17

45. 200 Ω
47. 0 W, 3.39 mVAR
49. 0.00541 μF
51. La fluctuación se reduce.
53. 4.55 kΩ
55. $V_1 = 3.103$ V; $V_2 = 6.828$ V; $V_3 = 2.069$ V
57. I_C @ 1 kHz = 1.383 mA; I_C @ 500 Hz = 0.691 mA
I_C @ 2 kHz = 2.768 mA
59. C_4 en cortocircuito

Capítulo 13

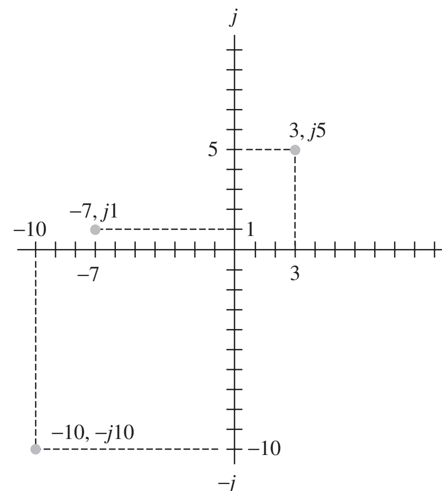
1. **(a)** 1000 mH **(b)** 0.25 mH **(c)** 0.01 mH **(d)** 0.5 mH
3. 50 mV
5. 20 mV
7. 0.94 μJ
9. El inductor 2 tiene tres cuartos de la inductancia del inductor 1.
11. 155 μH
13. 50.5 mH
15. 7.14 μH
17. **(a)** 4.33 H **(b)** 50 mH **(c)** 57.1 μH
19. **(a)** 1 μs **(b)** 2.13 μs **(c)** 2 μs
21. **(a)** 5.52 V **(b)** 2.03 V **(c)** 747 mV
(d) 275 mV **(e)** 101 mV
23. **(a)** 12.3 V **(b)** 9.10 V **(c)** 3.35 V
25. 11.0 μs
27. 0.722 μs
29. 136 μA
31. **(a)** 144 Ω **(b)** 10.1 Ω **(c)** 13.4 Ω
33. **(a)** 55.5 Hz **(b)** 796 Hz **(c)** 597 Hz
35. 26.1 mA
37. $V_1 = 12.953$ V; $V_2 = 11.047$ V; $V_3 = 5.948$ V;
$V_4 = 5.099$ V; $V_5 = 5.099$ V
39. L_3 abierto

Capítulo 14

1. 1.5 μH
3. 4; 0.25
5. **(a)** 00 V rms; en fase **(b)** 100 V rms; desfasado
(c) 20 V rms; desfasado
7. 600 V
9. 0.25 (4:1)
11. 60 V
13. **(a)** 10 V **(b)** 240 V
15. **(a)** 25 mA **(b)** 50 mA **(c)** 15 V **(d)** 750 mW
17. 1.83
19. 9.76 W
21. 94.5 W
23. 0.98
25. 25 kVA
27. $V_1 = 11.5$ V, $V_2 = 23.0$ V, $V_3 = 23.0$ V, $V_4 = 46.0$ V
29. **(a)** 48 V **(b)** 25 V
31. **(a)** $V_{RL} = 35$ V, $I_{RL} = 2.92$ A, $V_C = 15$ V, $I_C = 1.5$ A
(b) 34.5 Ω
33. Se extrae corriente primaria en exceso, potencialmente se quema la fuente y/o el transformador a menos que se proteja el primario con un fusible.
35. Relación de vueltas de 0.5
37. R_2 abierto

Capítulo 15

1. Magnitud, ángulo
3. Vea la figura P-18



▲ FIGURA P–18

5. **(a)** $-5, +j3$ y $5, -j3$ **(b)** $-1, -j7$ y $1, +j7$
(c) $-10, +j10$ y $10, -j10$

7. 18.0

9. **(a)** $643 - j766$ **(b)** $-14.1 + j5.13$
(c) $-17.7 - j17.7$ **(d)** $-3 + j0$

11. **(a)** Cuarto **(b)** Cuarto
(c) Cuarto **(d)** Primero

13. **(a)** $12\angle 115°$ **(b)** $20\angle 230°$
(c) $100\angle 190°$ **(d)** $50\angle 160°$

15. **(a)** $1.1 + j0.7$ **(b)** $-81 - j35$
(c) $5.28 - j5.27$ **(d)** $-50.4 + j62.5$

17. **(a)** $3.2\angle 11°$ **(b)** $7\angle -101°$
(c) $1.52\angle 70.6°$ **(d)** $2.79\angle -63.5°$

19. 8 kHz, 8 kHz

21. **(a)** $270\ \Omega - j100\ \Omega$, $288\angle -20.3°\ \Omega$
(b) $680\ \Omega - j1000\ \Omega$, $1.21\angle -55.8°\ \text{k}\Omega$

23. **(a)** $56\ \text{k}\Omega - j723\ \text{k}\Omega$
(b) $56\ \text{k}\Omega - j145\ \text{k}\Omega$
(c) $56\ \text{k}\Omega - j72.3\ \text{k}\Omega$
(d) $56\ \text{k}\Omega - j28.9\ \text{k}\Omega$

25. **(a)** $R = 33\ \Omega, X_C = 50\ \Omega$
(b) $R = 272\ \Omega, X_C = 127\ \Omega$
(c) $R = 698\ \Omega, X_C = 1.66\ \text{k}\Omega$
(d) $R = 558\ \Omega, X_C = 558\ \Omega$

27. **(a)** $183\angle 57.5°\ \mu\text{A}$
(b) $611\angle 40.3°\ \mu\text{A}$
(c) $1.98-76.2°$ mA

29. $-14.5°$

31. **(a)** $97.3\angle -54.9°\ \Omega$
(b) $103\angle 54.9°$ mA
(c) $5.76\angle 54.9°$ V
(d) $8.18\angle -35.1°$ V

33. $R_X = 12\ \Omega$, $C_X = 13.3\ \mu\text{F}$ en serie.

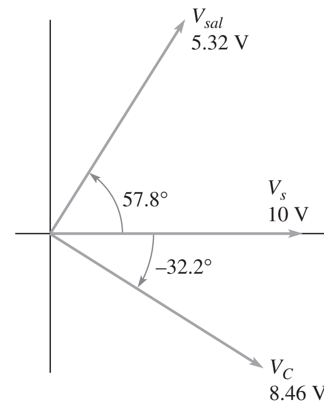
35.

0 Hz	1 V
1 kHz	723 mV
2 kHz	464 mV
3 kHz	329 mV
4 kHz	253 mV
5 kHz	205 mV
6 kHz	172 mV
7 kHz	148 mV
8 kHz	130 mV
9 kHz	115 mV
10 kHz	104 mV

37.

0 Hz	0 V
1 kHz	5.32 V
2 kHz	7.82 V
3 kHz	8.83 V
4 kHz	9.29 V
5 kHz	9.53 V
6 kHz	9.66 V
7 kHz	9.76 V
8 kHz	9.80 V
9 kHz	9.84 V
10 kHz	9.87 V

39. Vea la figura P-19.



▲ **FIGURA P–19**

41. $245\ \Omega$, $-80.5°$

43. $\mathbf{V}_C = \mathbf{V}_R = 10\angle 0°$ V
$\mathbf{I}_{tot} = 184\angle 37.1°$ mA
$\mathbf{I}_R = 147\angle 0°$ mA
$\mathbf{I}_C = 111\angle 90°$ mA

45. **(a)** $6.59\angle -48.8°\ \Omega$ **(b)** $10-0°$ mA
(c) $11.4\angle 90°$ mA **(d)** $15.2-48.8°$ mA
(e) $-48.8°$ (I_{tot} leading V_s)

47. El resistor de 18.4 kΩ en serie con el capacitor de 196 pF.

49. $\mathbf{V}_{C1} = 8.42\angle -2.9°$ V, $\mathbf{V}_{C2} = 1.58\angle -57.5°$ V
$\mathbf{V}_{C3} = 3.65\angle 6.8°$ V, $\mathbf{V}_{R1} = 3.29\angle 32.5°$ V
$\mathbf{V}_{R2} = 2.36\angle 6.8°$ V, $\mathbf{V}_{R3} = 1.29\angle 6.8°$ V

51. $\mathbf{I}_{tot} = 79.5\angle 87.1°$ mA, $\mathbf{I}_{C2R1} = 6.99\angle 32.5°$ mA
$\mathbf{I}_{C3} = 75.7\angle 96.8°$ mA, $\mathbf{I}_{R2R3} = 7.16\angle 6.8°$ mA

53. $0.103\ \mu\text{F}$

55. $\mathbf{I}_{C1} = \mathbf{I}_{R1} = 2.27\angle 74.5°$ mA
$\mathbf{I}_{R2} = 2.04\angle 72.0°$ mA
$\mathbf{I}_{R3} = 246\angle 84.3°\ \mu\text{A}$
$\mathbf{I}_{R4} = 149\angle 41.2°\ \mu\text{A}$
$\mathbf{I}_{R5} = 180\angle 75.1°\ \mu\text{A}$
$\mathbf{I}_{R6} = \mathbf{I}_{C3} = 101\angle 135°\ \mu\text{A}$
$\mathbf{I}_{C2} = 101\angle 131°\ \mu\text{A}$

57. 4.03 VA

59. 0.914

61. **(a)** $I_{LA} = 4.8$ A, $I_{LB} = 3.33$ A

(b) $P_{rA} = 606$ VAR, $P_{rB} = 250$ VAR

(c) $P_{realA} = 979$ W, $P_{realB} = 759$ W

(d) $P_{aA} = 1151$ VA, $P_{aB} = 799$ VA

(e) Carga *A*

63. 0.0796 μF

65. V_{sal} se reduce a 2.83 V y θ a $-56.7°$.

67. **(a)** Ningún voltaje de salida **(b)** $320\angle -71.3°$ mV

(c) 500– 0° mV **(d)** 0 V

69. No hay falla

71. R_1 abierto

73. No hay falla

75. 48.4 Hz

Capítulo 16

1. 15 kHz

3. **(a)** $100\ \Omega + j50\ \Omega$; $112\angle 26.6°\ \Omega$

(b) $1.5\ \text{k}\Omega + j1\ \text{k}\Omega$; $1.80\angle 33.7°\ \text{k}\Omega$

5. **(a)** $17.4\angle 46.4°\ \Omega$ **(b)** $64.0\angle 79.2°\ \Omega$

(c) $127\angle 84.6°\ \Omega$ **(d)** $251\angle 87.3°\ \Omega$

7. 806 Ω, 4.11 mH

9. 0.370 V

11. **(a)** $43.5\angle -55°$ mA **(b)** $11.8\angle -34.6°$ mA

13. θ se incrementa de 38.7° a 58.1°.

15. **(a)** $\mathbf{V}_R = 4.85\angle -14.1°$ V

$\mathbf{V}_L = 1.22\angle 75.9°$ V

(b) $\mathbf{V}_R = 3.83\angle -40.0°$ V

$\mathbf{V}_L = 3.21\angle 50.0°$ V

(c) $\mathbf{V}_R = 2.16\angle -64.5°$ V

$\mathbf{V}_L = 4.51\angle 25.5°$ V

(d) $\mathbf{V}_R = 1.16\angle -76.6°$ V

$\mathbf{V}_L = 4.86\angle 13.4°$ V

17. **(a)** $-0.0923°$ **(b)** $-9.15°$ **(c)** $-58.2°$ **(d)** $-86.4°$

19. $7.75\angle 49.9°\ \Omega$

21. 2.39 kHz

23. **(a)** $274\angle 60.7°\ \Omega$ **(b)** $89.3\angle 0°$ mA

(c) $159\angle -90°$ mA **(d)** $182\angle -60.7°$ mA

(e) 60.7° (I_{tot} retrasada con respecto a V_s)

25. El resistor de 1.83 Ω en serie con la reactancia inductiva de 4.21 kΩ.

27. $\mathbf{V}_{R1} = 21.8\angle -3.89°$ V

$\mathbf{V}_{R2} = 7.27\angle 9.61°$ V

$\mathbf{V}_{R3} = 3.38\angle -53.3°$ V

$\mathbf{V}_{L1} = \mathbf{V}_{L2} = 6.44\angle 37.3°$ V

29. $\mathbf{I}_{R1} = I_T = 389\angle -3.89°$ mA

$\mathbf{I}_{R2} = 330\angle 9.61°$ mA

$\mathbf{I}_{R3} = 102\angle -53.3°$ mA

$\mathbf{I}_{L1} = \mathbf{I}_{L2} = 51.3\angle -52.7°$ mA

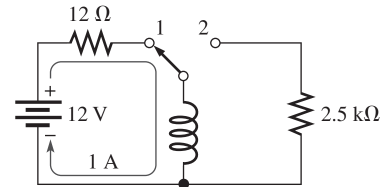
31. **(a)** $588\angle -50.5°$ mA

(b) $22.0\angle 16.1°$ V

(c) $8.63\angle -135°$ V

33. $\theta = 52.5°$ (V_{sal} retrasado con respecto a V_{ent}), 0.143

35. Vea la figura P-20.



▲ **FIGURA P–20**

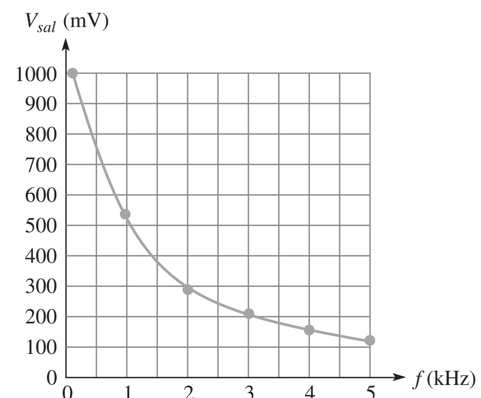
37. 1.29 W, 1.04 VAR

39. $P_{real} = 290$ mW; $P_r = 50.8$ mVAR;

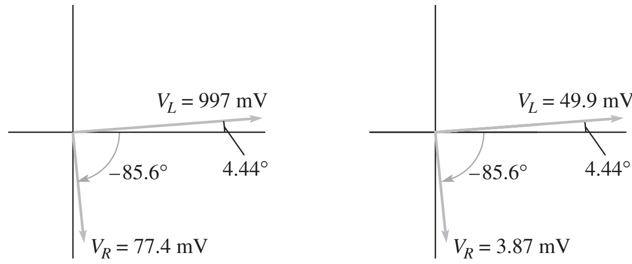
$P_a = 296$ mVA; $PF = 0.985$

41. Utilizar la fórmula, $V_{sal} = \left(\frac{R}{Z_{tot}}\right)V_{ent}$. Vea la figura P-21.

FRECUENCIA (kHz)	X_L	Z_{tot}	V_{sal}
0	0 Ω	39.0 Ω	1 V
1	62.8 Ω	73.9 Ω	528 mV
2	126 Ω	132 Ω	296 mV
3	189 Ω	193 Ω	203 mV
4	251 Ω	254 Ω	153 mV
5	314 Ω	317 Ω	123 mV



▲ **FIGURA P–21**



▲ FIGURA P–22

43. Vea la figura P-22.

45. **(a)** 0 V **(b)** 0 V
(c) $1.62\angle -25.8°$ V **(d)** $2.15\angle -64.5°$ V

47. L_1 con fugas

49. L_1 abierto

51. No hay falla

53. $f_c \approx 53.214$ kHz

Capítulo 17

1. $520\angle -88.9°\ \Omega$; 520 Ω capacitivo

3. La impedancia se incrementa a 150 Ω

5. $\mathbf{I}_{tot} = 61.4\angle -43.8°$ mA
$\mathbf{V}_R = 2.89\angle -43.8°$ V
$\mathbf{V}_L = 4.91\angle 46.2°$ V
$\mathbf{V}_C = 2.15\angle -134°$ V

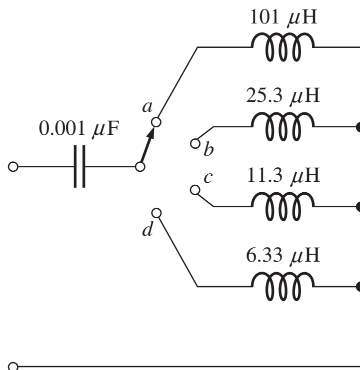
7. **(a)** $35.8\angle 65.1°$ mA
(b) 181 mW
(c) 390 mVAR
(d) 430 mVA

9. 12 V

11. $Z = 200\ \Omega$, $X_C = X_L = 2\ \text{k}\Omega$

13. 500 mA

15. Vea la figura P-23.



▲ FIGURA P–23

17. El ángulo de fase de −4.43° indica un circuito levemente capacitivo.

19. $\mathbf{I}_R = 50\angle 0°$ mA
$\mathbf{I}_L = 4.42\angle -90°$ mA
$\mathbf{I}_C = 8.29\angle 90°$ mA
$\mathbf{I}_{tot} = 50.2\angle 4.43°$ mA
$\mathbf{V}_R = \mathbf{V}_L = \mathbf{V}_C = 5\angle 0°$ V

21. $\mathbf{I}_R = 50\angle 0°$ mA, $\mathbf{I}_L = 531\angle -90°\ \mu$A,
$\mathbf{I}_C = 69.1\angle 90°\ \mu$A, $\mathbf{I}_{tot} = 84.9\angle 53.9°$ mA

23. 53.5 MΩ, 104 kHz

25. $P_r = 0$ VAR, $P_a = 7.45\ \mu$VA, $P_{\text{real}} = 538$ mW

27. **(a)** −1.97° (V_s retrasado con respecto a I_{tot})
(b) 23.0° (V_s adelantado con respecto a I_{tot})

29. Un resistor de 49.1 kΩ en serie con un inductor de 1.38 H

31. 45.2° (I_2 adelantada con respecto a V_s)

33. $\mathbf{I}_{R1} = \mathbf{I}_{C1} = 1.09\angle -25.7°$ mA
$\mathbf{I}_{R2} = 767\angle 19.3°\ \mu$A
$\mathbf{I}_{C2} = 767\angle 109.3°\ \mu$A
$\mathbf{I}_L = 1.53\angle -70.7°$ mA
$\mathbf{V}_{R2} = \mathbf{V}_{C2} = \mathbf{V}_L = 7.67\angle 19.3°$ V
$\mathbf{V}_{R1} = 3.60\angle -25.7°$ V
$\mathbf{V}_{C1} = 1.09\angle -116°$ V

35. $52.2\angle 126°$ mA

37. $f_{r(\text{en serie})} = 4.11$ kHz
$\mathbf{V}_{sal} = 4.83\angle -61.0°$ V
$f_{r(\text{en paralelo})} = 2.6$ kHz
$\mathbf{V}_{sal} \cong 10\angle 0°$ V

39. 62.5 Hz

41. 1.38 W

43. 200 Hz

45. C_1 con fugas

47. C_1 con fugas

49. No hay falla

51. $f_c \approx 338.698$ kHz

Capítulo 18

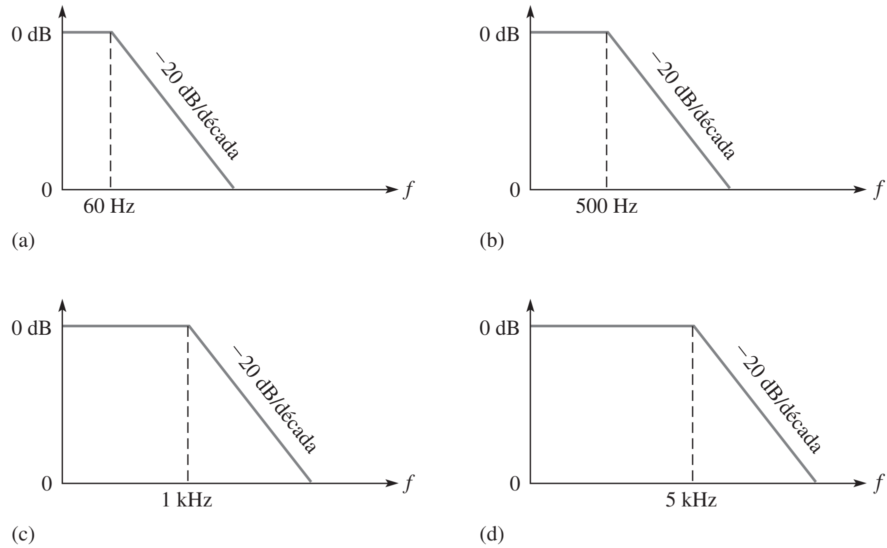
1. $2.22\angle -77.2°$ V rms

3. **(a)** $9.36\angle -20.7°$ V
(b) $7.18\angle -44.1°$ V
(c) $9.96\angle -5.44°$ V
(d) $9.95\angle -5.74°$ V

5. **(a)** 12.1 μF **(b)** 1.45 μF
(c) 0.723 μF **(d)** 0.144 μF

7. Vea la figura P-24.

▶ **FIGURA P–24**



9. **(a)** 7.13 V **(b)** 5.67 V
(c) 4.01 V **(d)** 0.800 V

11. 9.75∠12.8° V

13. **(a)** 3.53∠69.3° V
(b) 4.85∠61.0° V
(c) 947∠84.6° mV
(d) 995∠84.3° mV

15. Vea la figura P-25.

17. **(a)** 14.5 kHz
(b) 24.0 kHz

19. **(a)** 15.06 kHz, 13.94 kHz
(b) 25.3 kHz, 22.7 kHz

21. **(a)** 117 V **(b)** 115 V

23. $C = 0.064\ \mu$F, $L = 989\ \mu$H, $f_r = 20$ kHz

25. **(a)** 86.3 Hz
(b) 7.34 MHz

27. $L_1 = 0.08\ \mu$H,
$L_2 = 0.554\ \mu$H

29. C_2 con fugas

31. C_1 en cortocircuito

33. No hay falla

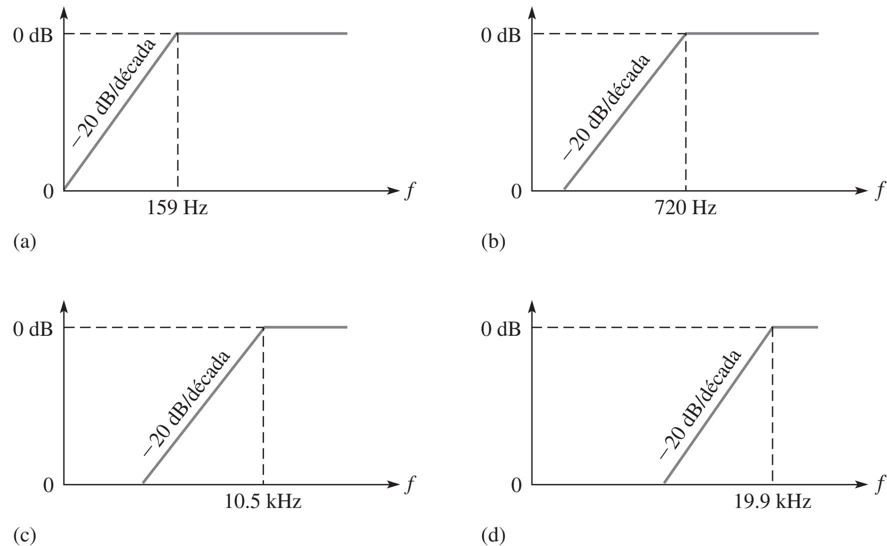
35. $BW \approx 88.93$ MHz

Capítulo 19

1. 1.22∠28.6° mA

3. 81.0∠−11.9° mA

▶ **FIGURA P–25**



5. $V_{A(\text{cd})} = 0$ V, $V_{B(\text{cd})} = 16.1$ V, $V_{C(\text{cd})} = 15.1$ V, $V_{D(\text{cd})} = 0$ V, $V_{A(\text{pico})} = 9$ V, $V_{B(\text{pico})} = 5.96$ V, $V_{C(\text{pico})} = V_{D(\text{pico})} = 4.96$ V

7. **(a)** $\mathbf{V}_{th} = 15\angle -53.1°$ V

$\mathbf{Z}_{th} = 63\ \Omega - j48\ \Omega = 79.2\angle -37.3°\ \Omega$

(b) $\mathbf{V}_{th} = 1.22\angle 0°$ V

$\mathbf{Z}_{th} = j237\ \Omega = 237\angle 90°\ \Omega$

(c) $\mathbf{V}_{th} = 12.1\angle 11.9°$ V

$\mathbf{Z}_{th} = 50\ \text{k}\Omega - j20\ \text{k}\Omega = 53.9\angle -21.8°\ \text{k}\Omega$

9. $16.9\angle 88.2°$ V

11. **(a)** $\mathbf{I}_n = 189\angle -15.8°$ mA

$\mathbf{Z}_n = 63\ \Omega - j48\ \Omega$

(b) $\mathbf{I}_n = 5.15\angle -90°$ mA

$\mathbf{Z}_n = j237\ \Omega$

(c) $\mathbf{I}_n = 224\angle 33.7°\ \mu$A

$\mathbf{Z}_n = 50\ \text{k}\Omega - j20\ \text{k}\Omega$

13. $16.8 - 88.5°$ V

15. $9.18\ \Omega + j2.90\ \Omega$

17. $95.2\ \Omega + j42.7\ \Omega$

19. C_2 con fugas

21. No hay falla

23. $\mathbf{I}_n = 30.142\angle -113.1°\ \mu$A

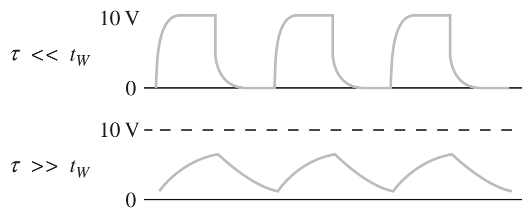
$\mathbf{Z}_n = 30.3\angle 64.28°\ \text{k}\Omega$

Capítulo 20

1. 103 μs

3. 12.6 V

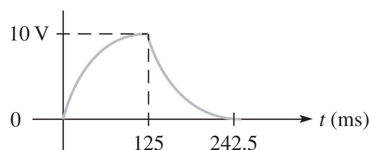
5. Vea la figura P-26.



▲ **FIGURA P–26**

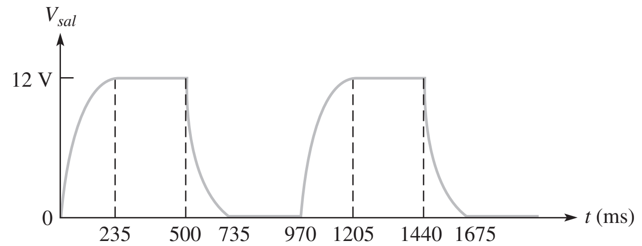
7. **(a)** 23.5 ms

(b) Vea la figura P-27.



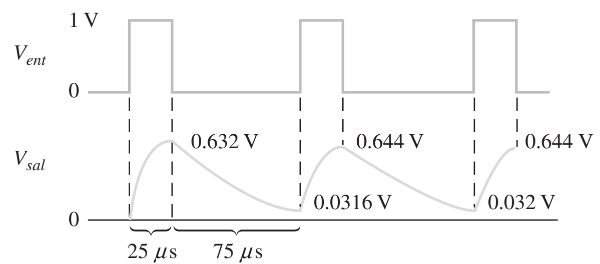
▲ **FIGURA P–27**

9. Vea la figura P-28.



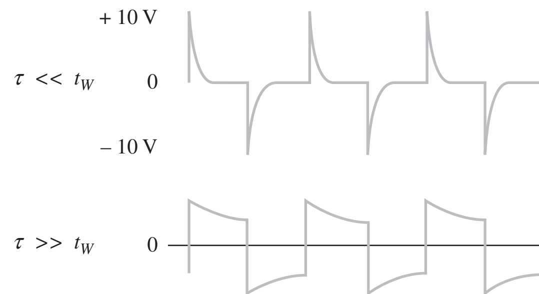
▲ **FIGURA P–28**

11. Vea la figura P-29.



▲ **FIGURA P–29**

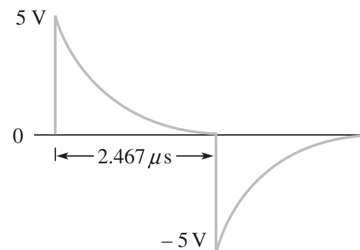
13. Vea la figura P-30.



▲ **FIGURA P–30**

15. **(a)** 493.5 ns

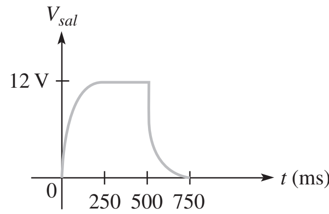
(b) Vea la figura P-31.



▲ **FIGURA P–31**

17. Una onda seno aproximada con valor promedio de cero.

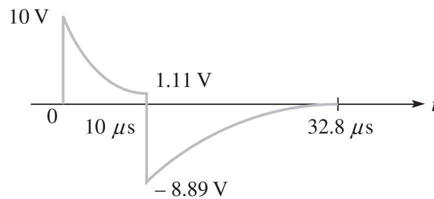
19. Vea la figura P-32.



▲ **FIGURA P–32**

21. **(a)** 4.55 μs

(b) Vea la figura P-33.



▲ **FIGURA P–33**

23. 15.9 kHz

25. **(a)** Capacitor abierto o R en cortocircuito.

(b) C con fugas o $R > 3.3\ \text{k}\Omega$ o $C > 0.22\ \mu\text{F}$

(c) Resistor abierto o capacitor en cortocircuito

27. C_1 abierto o R_1 en cortocircuito

29. R_1 o R_2 abierto

Capítulo 21

1. 17.5°

3. 376 mA

5. 1.32– 121° A

7. $\mathbf{I}_{La} = 8.66\angle -30°$ A

$\mathbf{I}_{Lb} = 8.66\angle 90°$ A

$\mathbf{I}_{Le} = 8.66\angle -150°$ A

9. **(a)** $\mathbf{V}_{L(ab)} = 866\angle -30°$ V

$\mathbf{V}_{L(ca)} = 866\angle -150°$ V

$\mathbf{V}_{L(bc)} = 866\angle 90°$ V

(b) $\mathbf{I}_{\theta a} = 500\angle -32°$ mA

$\mathbf{I}_{\theta b} = 500\angle 88°$ mA

$\mathbf{I}_{\theta c} = 500\angle -152°$ mA

(c) $\mathbf{I}_{La} = 500\angle -32°$ mA

$\mathbf{I}_{Lb} = 500\angle 88°$ mA

$\mathbf{I}_{Lc} = 500\angle -152°$ mA

(d) $\mathbf{I}_{Za} = 500\angle -32°$ mA

$\mathbf{I}_{Zb} = 500\angle 88°$ mA

$\mathbf{I}_{Zc} = 500\angle -152°$ mA

(e) $\mathbf{V}_{Za} = 500\angle 0°$ V

$\mathbf{V}_{Zb} = 500\angle 120°$ V

$\mathbf{V}_{Zc} = 500\angle -120°$ V

11. **(a)** $\mathbf{V}_{L(ab)} = 86.6\angle -30°$ V

$\mathbf{V}_{L(ca)} = 86.6\angle -150°$ V

$\mathbf{V}_{L(bc)} = 86.6\angle 90°$ V

(b) $\mathbf{I}_{\theta a} = 250\angle 110°$ mA

$\mathbf{I}_{\theta b} = 250\angle -130°$ mA

$\mathbf{I}_{\theta c} = 250\angle -10°$ mA

(c) $\mathbf{I}_{La} = 250\angle 110°$ mA

$\mathbf{I}_{Lb} = 250\angle -130°$ mA

$\mathbf{I}_{Lc} = 250\angle -10°$ mA

(d) $\mathbf{I}_{Za} = 144\angle 140°$ mA

$\mathbf{I}_{Zb} = 144\angle 20°$ mA

$\mathbf{I}_{Zc} = 144\angle -100°$ mA

(e) $\mathbf{V}_{Za} = 86.6\angle -150°$ V

$\mathbf{V}_{Zb} = 86.6\angle 90°$ V

$\mathbf{V}_{Zc} = 86.6\angle -30°$ V

13. $\mathbf{V}_{L(ab)} = 330\angle -120°$ V

$\mathbf{V}_{L(ca)} = 330\angle 120°$ V

$\mathbf{V}_{L(bc)} = 330\angle 0°$ V

$\mathbf{I}_{Za} = 38.2\angle -150°$ A

$\mathbf{I}_{Zb} = 38.2\angle -30°$ A

$\mathbf{I}_{Zc} = 38.2\angle 90°$ A

15. Figura 21-37: 636 W

Figura 21-38: 149 W

Figura 21-39: 12.8 W

Figura 21-40: 2.78 kW

Figura 21-41: 10.9 kW

17. 24.2 W

GLOSARIO



abierto Condición dada en un circuito en la cual no existe una trayectoria completa para la corriente.

acoplamiento magnético Conexión magnética entre dos bobinas como resultado de las líneas de flujo magnético variable de una bobina que pasan a través de la segunda bobina.

adelanto Se refiere a una condición de la relación de fase o de tiempo de formas de onda en la cual una forma de onda se adelanta a la otra en fase o tiempo; además, es una conexión de alambre o cable a un dispositivo o instrumento.

admitancia (*Y*) Medida de la capacidad de un circuito reactivo para permitir el paso de la corriente; es el recíproco de la impedancia. La unidad es el siemens (S).

aislador Material que no permite el paso de corriente en condiciones normales.

aislamiento eléctrico Condición que existe cuando dos bobinas están magnéticamente vinculadas pero sin conexión eléctrica entre sí.

ajustable No lineal, tal como un potenciómetro ajustable.

altavoz Dispositivo electromagnético que convierte señales eléctricas en ondas sonoras.

ampere (A) Es la unidad de corriente eléctrica.

ampere-vuelta Corriente en una sola espira (vuelta) de alambre.

amperímetro Instrumento eléctrico utilizado para medir corriente.

amplitud Es el valor máximo de un voltaje o una corriente.

ancho de banda Intervalo de frecuencias donde la corriente (o el voltaje de salida) es igual o mayor que el 70.7% de su valor en la frecuencia resonante que se considera un filtro deja pasar.

ancho de pulso (t_W) En el caso de un pulso no ideal, tiempo entre los puntos correspondientes al 50% de los bordes de entrada y salida; intervalo de tiempo entre los escalones opuestos de un pulso ideal.

armónicos Frecuencias contenidas en una forma de onda compuesta, las cuales son múltiplos enteros de la frecuencia de repetición (fundamental).

atenuación Reducción de la señal de salida comparada con la señal de entrada, cuyo resultado es una relación con un valor menor a 1 para el voltaje de salida respecto al voltaje de entrada de un circuito.

átomo Es la partícula más pequeña de un elemento que posee las características únicas de dicho elemento.

autotransformador Transformador en el cual el primario y el secundario están en un solo devanado.

AWG American Wire Gauge; estandarización basada en el diámetro de alambres.

batería o acumulador Fuente de energía que utiliza una reacción química para convertir energía química en energía eléctrica.

bobina Tipo de inductor utilizado para bloquear o detener frecuencias altas.

borde ascendente Es la transición hacia positivo de un pulso.

borde de ataque Primer paso o transición de un pulso.

borde de salida El segundo paso de transición de un pulso.

caída (roll-off) Tasa de reducción en la respuesta de un filtro a la frecuencia.

caída de voltaje Disminución del voltaje en un resistor debido a pérdida de energía.

campo electromagnético Formación de un conjunto de líneas de fuerza magnéticas alrededor de un conductor creadas por la corriente eléctrica presente en el conductor.

campo magnético Campo de fuerza que irradia del polo norte al polo sur de un imán.

capa Órbita en la cual gira un electrón.

capacitancia Propiedad de un capacitor de almacenar carga eléctrica.

capacitor Dispositivo eléctrico que consta de dos placas conductoras separadas por un material aislante y posee la propiedad de capacitancia.

capacitor ajustable Pequeño capacitor variable.

carga (1) Elemento (resistor u otro componente) conectado a través de las terminales de salida de un circuito y que absorbe corriente de la fuente; elemento en un circuito sobre el cual se realiza trabajo. **(2)** Propiedad eléctrica de la materia que existe a causa de un exceso o una deficiencia de electrones. La carga puede ser positiva o negativa.

carga balanceada Condición en la cual todas las corrientes de carga son iguales y la corriente neutra es de cero.

carga reflejada Es la carga tal como aparece ante la fuente en el primario de un transformador.

celda fotoconductora Tipo de resistor variable sensible a la luz.

ciclo Repetición de una forma de onda periódica.

ciclo de trabajo Característica de una forma de onda pulsante que indica el porcentaje de tiempo que un pulso está presente durante un ciclo; es la relación del ancho de pulso al periodo, expresada o como una fracción o como un porcentaje.

circuito Interconexión de componentes eléctricos diseñada para producir un resultado deseado. Un circuito básico se compone de una fuente, una carga, y una trayectoria para la corriente de enlace.

circuito abierto Circuito en el cual no existe una trayectoria completa para la corriente.

circuito cerrado Circuito con trayectoria completa para la corriente.

circuito equivalente Circuito que produce el mismo voltaje y la misma corriente para una carga dada que el circuito original al que reemplaza.

circuito tanque Circuito resonante dispuesto en paralelo.

coeficiente Número constante que aparece frente a una variable.

coeficiente de acoplamiento (k) Constante asociada con transformadores que es la relación del flujo magnético secundario al flujo magnético primario. El valor ideal de 1 indica que todo el flujo en el devanado primario está acoplado al devanado del secundario.

coeficiente de temperatura Constante que especifica la cantidad de cambio en el valor de una cantidad para un cambio de temperatura dado.

complejo conjugado Número complejo que tiene la misma parte real y una parte imaginaria de signo opuesto; es una impedancia que contiene la misma resistencia y una reactancia opuesta en fase pero igual en magnitud a la de una impedancia dada.

componente de cd Valor promedio de una forma de onda pulsante.

común Tierra de referencia.

conductancia (G) Capacidad de un circuito para permitir el paso de corriente; es el recíproco de la resistencia. La unidad es el siemens (S).

conductor Material en el cual la corriente eléctrica se establece con facilidad. Un ejemplo es el cobre.

constante de tiempo Intervalo de tiempo fijo, establecido por valores R y C o R y L, que determina la respuesta de un circuito en el tiempo.

constante de tiempo *RC* Intervalo fijo de tiempo establecido por los valores de R y C que determina la respuesta de un circuito RC dispuesto en serie. Es igual al producto de la resistencia por la capacitancia.

constante de tiempo *RL* Intervalo fijo de tiempo establecido por los valores de R y L que determina la respuesta de un circuito en el tiempo y es igual a L/R.

constante dieléctrica Medida de la capacidad de un material dieléctrico para establecer un campo eléctrico.

corriente Es la velocidad de flujo de la carga (electrones).

corriente de fase (I_0) Corriente a través de un devanado de generador.

corriente de lazo Corriente asignada a un circuito sólo para el propósito de análisis matemático y que normalmente no representa la corriente física real.

corriente de línea Corriente a través de una línea que alimenta una carga.

corriente de rama La corriente real en una rama.

corriente inducida (i_{ind}) Corriente producida en un conductor cuando éste se mueve por un campo magnético.

corriente remanente Corriente resultante luego de que la corriente total suministrada a la carga es restada de la corriente total suministrada al circuito.

cortacircuito Dispositivo protector restaurable utilizado para interrumpir la corriente excesiva en un circuito eléctrico.

corto Condición dada en un circuito eléctrico en la cual existe una trayectoria de resistencia cero o anormalmente baja entre dos puntos; casi siempre es una condición accidental.

coulomb (C) La unidad de carga eléctrica; es la carga total poseída por 6.25×10^{18} electrones.

choque eléctrico Sensación física resultante de la corriente eléctrica a través del cuerpo.

década Un cambio de diez en diez de la frecuencia o de otro parámetro.

decibel Medición logarítmica de la relación de una potencia a otra o de un voltaje a otro, la cual puede ser utilizada para expresar la relación de entrada a salida en un filtro.

densidad de flujo magnético Cantidad de flujo por unidad de área perpendicular al campo magnético.

determinante Solución de una matriz que consiste en un arreglo de coeficientes y constantes para un conjunto de ecuaciones simultáneas.

devanado Espiras o vueltas de alambre en un inductor.

devanado de campo Devanado en el rotor de un generador de ca.

devanado primario Devanado de entrada de un transformador; llamado también *primario*.

devanado secundario Devanado de salida de un transformador; también es llamado *secundario*.

diagrama de Bode Gráfica de la respuesta a la frecuencia de un filtro que muestra el cambio de la relación del voltaje de salida al voltaje de entrada expresado en dB como una función de la frecuencia para un voltaje de entrada constante.

dieléctrico Material aislante colocado entre las placas de un capacitor.

diferenciador Circuito que produce una salida que se aproxima a la derivada matemática de la entrada.

disparador Señal de activación de algunos dispositivos o instrumentos electrónicos.

división a la mitad Procedimiento de localización de fallas en el que se inicia a la mitad de un circuito o sistema y, según la primera medición, se trabaja hacia la salida o hacia la entrada para localizar la falla.

divisor de corriente Circuito en paralelo en el cual las corrientes se dividen inversamente en proporción a las resistencias de las ramas en paralelo.

divisor de voltaje Circuito que consiste de resistores en serie a través de los cuales se toman uno o más voltajes de salida.

ecuaciones simultáneas Conjunto de n ecuaciones que contienen n incógnitas, donde n es un número con valor de 2 o más alto.

efecto fotovoltaico Proceso mediante el cual la energía luminosa se convierte directamente en energía eléctrica.

efecto piezoeléctrico Propiedad de un cristal mediante la cual un esfuerzo mecánico variable produce voltaje a través de un cristal.

efecto Seebeck Generación de un voltaje en la unión de dos materiales diferentes que tienen diferencia de temperatura entre sí.

eficiencia Relación de la potencia de salida suministrada a una carga a la potencia de entrada a un circuito, casi siempre es expresada como un porcentaje.

eléctrico Referencia al uso de voltaje y corriente eléctricos para alcanzar resultados deseados.

electromagnetismo Producción de un campo magnético mediante la corriente que circula en un conductor.

electrón La partícula básica de carga eléctrica en la materia. El electrón posee carga negativa.

electrón de valencia Electrón presente en la capa más externa de un átomo.

electrón libre Electrón de valencia que se ha separado de su átomo padre y está libre para moverse de un átomo a otro dentro de la estructura atómica de un material.

electrónico Referencia al movimiento y control de electrones libres en semiconductores o dispositivos al vacío.

elemento Una de las sustancias básicas que forman el universo conocido. Cada elemento se caracteriza por una estructura atómica única.

energía Es la capacidad de realizar trabajo.

equivalencia terminal Concepto para definir que cuando cualquier resistencia de carga dada se conecta a dos fuentes, el mismo voltaje de carga y la misma corriente de carga son producidos por ambas fuentes.

esquema Diagrama que simboliza un circuito eléctrico o electrónico.

estado estable Condición de equilibrio de un circuito que ocurre después de un instante transitorio inicial.

estator Parte externa estacionaria de un generador o un motor.

exponente Número al cual se eleva un número base.

factor de calidad (*Q*) La relación de potencia real a potencia reactiva en un circuito resonante, o la relación de reactancia inductiva a resistencia del devanado en un inductor.

factor de potencia Relación entre volt-amperes y potencia real o watts. Volt-amperes multiplicados por el factor de potencia es igual a la potencia real.

farad (F) La unidad de capacitancia.

fase Desplazamiento angular relativo de una cantidad que varía con el tiempo con respecto a una referencia dada.

fasor Representación de una onda seno en función de su magnitud (amplitud) y dirección (ángulo de fase).

filtro Tipo de circuito que deja pasar ciertas frecuencias y rechaza todas las demás.

filtro detienebandas Dispositivo que rechaza un intervalo de frecuencias ubicadas entre dos frecuencias críticas y deja pasar frecuencias localizadas por encima y por debajo de ese intervalo.

filtro pasaaltas Tipo de filtro que deja pasar todas las frecuencias ubicadas por encima de una frecuencia crítica y rechaza todas las frecuencias localizadas por debajo de dicha frecuencia crítica.

filtro pasabajas Tipo de filtro que deja pasar todas las frecuencias ubicadas por debajo de una frecuencia crítica y rechaza todas las frecuencias localizadas por encima de dicha frecuencia crítica.

filtro pasabandas Dispositivo que deja pasar un intervalo de frecuencias ubicadas entre dos frecuencias críticas y rechaza frecuencias localizadas por arriba o por debajo de ese intervalo.

flanco de bajada Es la transición hacia negativo de un pulso.

flujo magnético Líneas de fuerza entre los polos norte y sur de un imán permanente o de un electroimán.

forma de onda Patrón de variaciones de un voltaje o una corriente que muestra cómo cambia la cantidad con el tiempo.

forma de onda de diente de sierra Tipo de forma de onda eléctrica compuesta por rampas; es un caso especial de una forma de onda triangular donde una rampa es mucho más corta que la otra.

forma de onda triangular Tipo de forma de onda eléctrica compuesta por dos rampas.

forma polar Forma de un número complejo compuesto de una magnitud y un ángulo.

forma rectangular Forma de un número complejo compuesta por una parte real y una parte imaginaria.

frecuencia Medida de la razón de cambio de una función periódica; es el número de ciclos completados en 1 segundo. La unidad de frecuencia es el hertz.

frecuencia a potencia media Frecuencia a la cual la potencia de salida de un circuito resonante es un 50% de la potencia máxima (el voltaje de salida es un 70.7% del voltaje máximo); es otro nombre para frecuencia crítica o de corte.

frecuencia central (f_0) Frecuencia resonante de un filtro pasabandas o uno detienebandas.

frecuencia crítica o frecuencia de corte (f_c) Frecuencia a la cual el voltaje de salida de un filtro es un 70.7% del voltaje máximo.

frecuencia de corte (f_c) Frecuencia a la cual el voltaje de salida de un filtro es del 70.7% del voltaje de salida máximo; es otro término para frecuencia crítica.

frecuencia de repetición de pulsos Frecuencia fundamental de una forma de onda de pulso repetitivo; rapidez a la cual se repiten los pulsos expresada en hertz o pulsos por segundo.

frecuencia fundamental Tasa de repetición de una forma de onda.

frecuencia resonante Frecuencia en la cual tiene lugar la resonancia; es conocida también como *frecuencia central*.

fuente Dispositivo que produce energía eléctrica.

fuente de corriente Dispositivo que proporciona una corriente constante a una carga variable.

fuente de potencia Dispositivo que suministra potencia a una carga.

fuente de potencia electrónica Fuente de voltaje que convierte el voltaje de ca de una toma de corriente de pared en voltaje constante de cd a un nivel adecuado para componentes electrónicos.

fuente de voltaje Dispositivo que proporciona un voltaje constante para una carga variable.

fuerza magnetomotriz (fmm) Es la causa de un campo magnético, medida en ampere-vueltas.

fusible Dispositivo protector que se funde cuando en un circuito la corriente se torna excesiva.

gauss (G) Unidad CGS de densidad de flujo.

generador Fuente de energía que produce señales eléctricas.

generador de funciones Instrumento electrónico que produce señales eléctricas en forma de ondas seno, ondas triangulares, y pulsos.

grado Es la unidad de medida angular correspondiente a 1/360 de una revolución completa.

henry (H) La unidad de inductancia.

hertz (Hz) La unidad de frecuencia. Un hertz es igual a un ciclo por segundo.

histéresis Característica de un material magnético mediante la cual un cambio de magnetización se retrasa con respecto a la aplicación de intensidad de campo magnético.

igualación de impedancias (acoplamiento) Técnica utilizada para igualar la resistencia de una carga a la resistencia de la fuente y lograr una transferencia máxima de potencia.

impedancia Oposición total a la corriente sinusoidal expresada en ohms.

inducción electromagnética Fenómeno o proceso mediante el cual se produce voltaje en un conductor cuando existe un movimiento relativo entre el conductor y un campo magnético o electromagnético.

inductancia Propiedad de un inductor mediante la cual un cambio de corriente permite que el inductor produzca un voltaje opuesto al cambio de corriente.

inductancia mutua Inductancia entre dos bobinas distintas, tal como en un transformador.

inductor Dispositivo eléctrico formado por un alambre arrollado alrededor de un núcleo y que tiene la propiedad de inductancia; también es conocido como *bobina*.

integrador Circuito que produce una salida que tiende a la integral matemática de la entrada.

intensidad de campo magnético Cantidad de fmm por unidad de longitud de material magnético; también es llamada *fuerza magnetizante*.

interruptor Dispositivo eléctrico para abrir y cerrar una trayectoria de corriente.

ion Átomo que tiene carga positiva o negativa.

jaula de ardilla Tipo de motor de inducción de ca.

joule (J) La unidad SI de energía.

kilowatt-hora (kWh) Unidad grande de energía utilizada principalmente por compañías de electricidad.

lazo o trayectoria cerrada Trayectoria cerrada para la corriente en un circuito.

ley de Coulomb Ley que establece la existencia de una fuerza entre dos cuerpos cargados que es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas.

ley de Faraday Ley que establece que el voltaje inducido a través de una bobina de alambre es igual al número de vueltas presente en ella por la razón de cambio del flujo magnético.

ley de la corriente de Kirchhoff Ley que estipula que la corriente total dirigida hacia un nodo es igual a la corriente total que sale del nodo. De forma equivalente, la suma algebraica de todas las corrientes que entran y salen de un nodo es cero.

ley de Lenz Ley que establece que al cambiar la corriente a través de una bobina, la polaridad del voltaje inducido creada por el campo magnético cambiante es tal que siempre se opone al cambio de corriente que la provocó. La corriente no puede cambiar instantáneamente.

ley de Ohm Ley que establece que la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia.

ley de Watt Ley que establece las relaciones de potencia a corriente, voltaje y resistencia.

ley del voltajes de Kirchhoff Ley que estipula que (1) la suma de las caídas de voltaje alrededor de una trayectoria cerrada única es igual al voltaje de la fuente en esa trayectoria cerrada, o (2) que la suma algebraica de todos los voltajes (caídas y fuentes) alrededor de una sola trayectoria cerrada es cero.

línea de base Nivel normal de una forma de onda de pulso; es el nivel de voltaje en ausencia de un pulso.

lineal Concepto caracterizado por una relación de línea recta.

líneas de fuerza En un campo magnético, líneas de flujo magnético que irradian del polo norte al polo sur.

localización de fallas Proceso sistemático de aislar, identificar y corregir una falla en un circuito o sistema.

magnitud Es el valor de una cantidad, tal como el número de volts de voltaje o el número de amperes de corriente.

matriz Arreglo de números.

mil circular (MC) Unidad de área de la sección transversal de un alambre.

MMD Multímetro digital; instrumento electrónico que combina medidores para medir voltaje, corriente y resistencia.

multímetro Instrumento que mide voltaje, corriente y resistencia.

multímetro digital Instrumento electrónico que combina medidores para medir voltaje, corriente y resistencia.

neutrón Partícula atómica que no tiene carga eléctrica.

nodo En un circuito, punto donde dos o más componentes están conectados; es conocido también como *unión*.

notación científica Sistema para representar cualquier número como un número situado entre 1 y 10 multiplicado por una potencia de diez apropiada.

notación de ingeniería Sistema para representar cualquier número como un número de uno, dos o tres dígitos multiplicado por una potencia de diez con un exponente que es un múltiplo de 3.

núcleo (1) Es la estructura física alrededor de la cual se forma el devanado de un inductor. El material del núcleo influye en las características magnéticas del inductor. **(2)** La parte central de un átomo la cual contiene protones y neutrones.

número atómico Cantidad de protones en un núcleo.

número imaginario Número que existe sobre el eje vertical del plano complejo.

número real Número que existe sobre el eje horizontal de un plano complejo.

ohm (Ω) La unidad de resistencia.

ohmmetro Instrumento para medir resistencia.

onda seno Tipo de forma de onda que sigue un patrón sinusoidal cíclico definido por la fórmula $y = A$ sen θ.

oscilador Circuito electrónico que produce una señal que varía con el tiempo sin una señal de entrada externa que utiliza retroalimentación positiva.

osciloscopio Instrumento de medición que muestra señales en forma de onda en la pantalla.

paralelo En circuitos eléctricos, la relación en la cual dos o más trayectorias de corriente están conectadas entre dos nodos distintos.

pasabanda Intervalo de la frecuencia que deja pasar un filtro.

periódico Caracterizado por una repetición a intervalos de tiempo fijos.

periodo (*T*) Intervalo de tiempo de un ciclo completo en una forma de onda periódica.

permeabilidad Medida de la facilidad con que un campo magnético puede ser establecido en un material.

plano complejo Área que consta de cuatro cuadrantes donde una cantidad que contiene tanto magnitud como dirección puede ser representada.

polarización Aplicación de voltaje de cd a un dispositivo electrónico para producir un modo de operación deseado.

potencia Rapidez del consumo de energía.

potencia aparente Combinación fasorial de potencia resistiva (potencia real o activa) y potencia reactiva. La unidad es el volt-ampere (VA).

potencia aparente nominal Método para clasificar transformadores en el cual la capacidad de potencia se expresa en volt-amperes (VA).

potencia de diez Representación numérica que consta de una base de 10 y un exponente; es el número 10 elevado a una potencia.

potencia instantánea Valor de la potencia presente en un circuito en cualquier instante dado.

potencia nominal Cantidad máxima de potencia que un resistor puede disipar sin ser dañado por la acumulación excesiva de calor.

potencia reactiva Rapidez a la cual la energía es alternadamente guardada y regresada a la fuente por un capacitor o un inductor. La unidad es el VAR.

potencia real Potencia disipada en un circuito, casi siempre en forma de calor.

potenciómetro Resistor variable de tres terminales.

precisión El grado al cual un valor medido representa el valor verdadero o aceptado de una cantidad.

prefijo métrico Afijo que representa un número de potencia de diez expresado en notación de ingeniería.

protón Partícula atómica positivamente cargada.

puente balanceado Circuito puente que está en estado balanceado indicado por un voltaje de 0 V entre sus terminales.

puente de Wheatstone Circuito puente de 4 patas mediante el cual se puede medir con precisión una resistencia desconocida utilizando el estado balanceado del puente. Las desviaciones de la resistencia se pueden medir utilizando el estado desbalanceado.

puente desbalanceado Circuito puente que se halla en estado desbalanceado conforme lo indica un voltaje en el puente que es proporcional a la cantidad de desviación con respecto al estado balanceado.

pulso Tipo de forma de onda que consta de dos escalones de voltaje o de corriente iguales y opuestos separados por un intervalo de tiempo.

radián Unidad de medición angular. Hay 2π radianes en una revolución completa de 360°. Un radián es igual a 57.3°.

rama Trayectoria para la corriente en un circuito en paralelo; una trayectoria para la corriente que conecta dos nodos.

rampa Tipo de forma de onda caracterizado por un incremento o una disminución lineal de voltaje o corriente.

reactancia capacitiva Oposición de un capacitor a la corriente sinusoidal. La unidad es el ohm (Ω).

reactancia inductiva Oposición de un inductor a la corriente sinusoidal. La unidad es el ohm (Ω).

rectificador Circuito electrónico que convierte ca en cd pulsante; es una parte de una fuente de potencia.

relación de vueltas (*n*) En el devanado secundario, es la relación de vueltas a las vueltas presentes en el devanado primario.

relevador Dispositivo mecánico controlado electromagnéticamente en el cual contactos eléctricos se abren o cierran debido a la acción de una corriente magnetizante.

reluctancia Oposición al establecimiento de un campo magnético en un material.

rendimiento en amperes-hora (Ah) Número dado en amperes-horas determinado al multiplicar la corriente (A) por el lapso de tiempo (h) que una batería puede suministrar dicha corriente a una carga.

reóstato Resistor variable de dos terminales.

resistencia Oposición a la corriente. La unidad es el ohm (Ω).

resistencia reflejada En el circuito secundario, es la resistencia reflejada en el circuito primario.

resistor Componente eléctrico específicamente diseñado para que ofrezca cierta cantidad de resistencia.

resolución Incremento más pequeño de una cantidad que un multímetro digital puede medir.

resonancia Condición presente en un circuito *RLC* en serie en la cual las reactancias capacitiva e inductiva son iguales en magnitud; por tanto, se eliminan entre sí y producen impedancia puramente resistiva.

resonancia en paralelo Condición dada en un circuito *RLC* en paralelo donde las reactancias idealmente son iguales y la impedancia es máxima.

resonancia en serie Condición dada en un circuito *RLC* dispuesto en serie en la cual la reactancia idealmente se cancela y la impedancia se reduce al mínimo.

respuesta a la frecuencia En circuitos eléctricos, es la variación del voltaje (o corriente) de salida dentro de un intervalo de frecuencias específico.

retentividad Capacidad de un material, una vez magnetizado, para mantener un estado magnetizado sin la presencia de una fuerza magnetizante.

retraso Se refiere a una condición de la relación de fase o de tiempo de formas de onda en la cual una forma de onda está detrás de la otra en fase o tiempo.

rigidez dieléctrica Medida de la capacidad de un material dieléctrico para soportar voltaje sin romperse.

rotor Ensamble rotatorio en un generador o un motor.

rozador o escobilla En un potenciómetro, es el contacto deslizable.

selectividad Medida de cómo un circuito resonante efectivamente deja pasar ciertas frecuencias deseadas y rechaza todas las demás. En general, mientras más angosto es el ancho de banda, mayor es la selectividad.

semiconductor Material que tiene un valor de conductancia ubicado entre el de un conductor y un aislador. El silicio y el germanio son ejemplos.

serie En un circuito eléctrico, es una relación de componentes donde los componentes están conectados de manera tal que sumi-

nistren una trayectoria única para la corriente que circula entre dos puntos.

SI Sistema internacional de unidades estandarizadas utilizado en todo trabajo científico y de ingeniería; es la abreviatura del francés *Le Système International d'Unités*.

siemens (S) La unidad de conductancia.

solenoide Dispositivo controlado electromagnéticamente en el cual el movimiento mecánico de una flecha o émbolo es activado por una corriente magnetizante.

susceptancia capacitiva (B_C) Característica de un capacitor de permitir el paso de corriente; es el recíproco de la reactancia capacitiva. La unidad es el siemens (S).

susceptancia inductiva Capacidad de un inductor para permitir el paso de corriente; es el recíproco de la reactancia inductiva. La unidad es el siemens (S).

teorema de Norton Método para simplificar un circuito lineal de dos terminales en uno equivalente con sólo una fuente de corriente dispuesta en paralelo con una resistencia o una impedancia.

teorema de superposición Método para efectuar el análisis de circuitos que tienen más de una fuente.

teorema de Thevenin Método para simplificar un circuito lineal de dos terminales a un circuito equivalente con sólo una fuente de voltaje dispuesta en serie con una resistencia o una impedancia.

termistor Tipo de resistor variable que es sensible a la temperatura.

termopar Tipo termoeléctrico de fuente de voltaje comúnmente utilizado para detectar temperatura.

tesla (T) Es la unidad SI para densidad de flujo.

tiempo de bajada (t_f) Intervalo de tiempo requerido para que un pulso cambie del 90 al 10% de su amplitud.

tiempo de elevación (t_r) Intervalo de tiempo requerido para que un pulso cambie del 10 al 90% de su amplitud.

tiempo transitorio Intervalo igual a aproximadamente cinco constantes de tiempo.

tierra de referencia Método de conexión a tierra mediante el cual una gran área conductiva de una tarjeta de circuito impreso o el chasis metálico que aloja el ensamble se utiliza como punto común o de referencia.

tierra En circuitos eléctricos, el punto común o de referencia.

tolerancia Límites de variación en el valor de un componente.

toma central (TC) Conexión en el punto medio de un devanado en un transformador.

transferencia de potencia máxima Transferencia de potencia máxima de una fuente a una carga cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia interna de la fuente.

transformador Dispositivo eléctrico construido con dos o más bobinas (devanados), acopladas electromagnéticamente entre sí, para proporcionar transferencia de potencia de una bobina a la otra.

transformador elevador Transformador en el cual el voltaje secundario es más grande que el voltaje primario.

transformador reductor Transformador en el cual el voltaje secundario es menor que el voltaje primario.

unión Punto en el cual dos o más componentes están conectados.

valencia Referencia a la capa externa u órbita de un átomo.

valor efectivo o eficaz Medida del efecto calefactor de una onda seno; también es conocido como valor rms (raíz cuadrática media).

valor instantáneo Valor de voltaje o de corriente de una forma de onda en un instante dado.

valor pico Es el valor de voltaje o de corriente de una forma de onda en sus puntos positivos o negativos máximos.

valor pico a pico Valor de voltaje o de corriente de una forma de onda medida desde sus puntos mínimos hasta sus puntos máximos.

valor promedio El promedio de una onda seno a lo largo de medio ciclo. Es de 0.637 veces el valor pico.

valor rms Valor de un voltaje sinusoidal que indica su efecto calefactor; es conocido también como valor eficaz. Es igual a 0.707 veces el valor pico. *rms* significa raíz cuadrada de la media de los cuadrados.

válvula solenoide Válvula controlada eléctricamente para controlar aire, agua, vapor, aceites, refrigerantes, y otros fluidos.

VAR (volt-ampere reactivo) Es la unidad de potencia reactiva.

varactor Dispositivo semiconductor que exhibe una característica de capacitancia que es variada cambiando el voltaje entre sus terminales.

velocidad angular La velocidad de rotación de un fasor que está relacionada con la frecuencia de la onda seno que el fasor representa.

volt Es la unidad de voltaje o fuerza electromotriz.

voltaje Cantidad de energía por carga disponible para mover electrones de un punto a otro en un circuito eléctrico.

voltaje de fase (V_0) El voltaje a través de un devanado de generador.

voltaje de línea El voltaje entre las líneas que alimentan una carga.

voltaje de rizo Variación del voltaje de cd en la salida de un filtro rectificador provocada por la leve acción de carga y descarga del capacitor filtro.

voltaje inducido (v_{ind}) Voltaje producido como resultado de un cambio del campo magnético.

voltímetro Instrumento utilizado para medir voltaje.

watt (W) Es la unidad de potencia. Un watt es la potencia cuando se utiliza 1 J de energía en 1 s.

weber Es la unidad SI de flujo magnético, la cual representa 10^8 líneas.

ÍNDICE